

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

EDUARDO VALADARES GOTTARDI

**APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E DE ESCÓRIA MOÍDA DE ACIARIA COMO FÍLER EM
PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO.**

**VITÓRIA
2015**

EDUARDO VALADARES GOTTARDI

**APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS
ORNAMENTAIS E DE ESCÓRIA MOÍDA DE ACIARIA COMO FÍLER EM
PAVIMENTOS DE CONCRETO ASFÁLTICO.**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama.

Co-Orientadora: Prof. Dr^a. Jamilla Emi Sudo Lutf Teixeira.

VITÓRIA

2015

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado às pessoas que perseveraram, as que lutaram e conquistaram e dedicaram suas vidas à minha:

Ao meu Senhor e Salvador JESUS CRISTO,
Aos meus pais, Carlos Alberto (In Memoriam) e Therezinha,
À minha esposa, Diva.

Aos meus filhos, Thiago, Pedro ,Guilherme e Josué.

MENSAGEM

"O que é impossível para os homens é possível para Deus".
Lucas 18:27

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus que me fez acreditar e me deu forças para concluir aquilo que parecia ser impossível.

Agradeço ao professor orientador João Calmon, que desde o primeiro momento acreditou este que o trabalho seria possível. Incentivou-me nos momentos em que quase desisti.

A professora co-orientadora Jamilla, pela ajuda com sua experiência na área de ensaios e gráficos, pela ajuda na correção dos artigos e gráficos.

Agradeço ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo: Carlos, Loriato, Márcio e Henrique.

Agradeço ao pessoal do Laboratório Alcino Vieira Brazil nas pessoas do Sr. Brazil, uma lenda viva dos Laboratórios de Solos e Pavimentação do Espírito Santo e do Brasil, aos seus filhos Marcelo Prado e Marquinhos “Cara Preta” (In Memoriam), pela dedicação, disposição e seriedade na realização deste projeto.

Agradeço aos pesquisadores da Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande.

A ArcelorMittal Tubarão, Pedreira Rydien e a Granriva Granitos, pelos materiais disponibilizados para esta pesquisa.

Aos Colegas do DER/ES Rodrigo, Gustavo, Neomar, Hilton Rubens, Luís Apolinário, Robson, José Carlos e Roseli, e também ao pessoal da Engespro, Contek, R.Monteiro, Cheim, A.Madeira, Almeida e Filho, pelo convívio e despertamento para coisas maiores durante esses anos.

A minha Esposa Diva pela paciência e aos meus filhos Thiago, Pedro, Guilherme e Josué, por ter dividido nossos momentos de comunhão com este trabalho.

A Natalino pelo presente profético com o qual paguei a inscrição para prova do mestrado.

As pessoas que me sustentaram com suas orações antes e durante este processo e que sustentarão depois em projetos ainda maiores.

RESUMO

Gottardi, E. V. **Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória moída de aciaria como fíler em pavimentos de concreto asfáltico**. 2015.106 f. trabalho de diplomação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

O Estado do Espírito Santo tem o maior complexo de pelotização de minério de ferro do mundo e é o maior produtor nacional de placas de aço. É, além disso, o maior exportador de mármore e granito da América Latina. O estado lidera a extração nacional de mármore e granito ornamentais, sendo responsável por 39% das exportações brasileiras de rochas ornamentais e por 50% de placas de mármore beneficiadas. Em contrapartida, o estado produz um grande volume de rejeitos industriais tais como escória de aciaria e resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais. Muitos trabalhos científicos têm estudado formas de empregar estes rejeitos na pavimentação. Diante do exposto, este trabalho visa contribuir nesta temática avaliando o comportamento mecânico e as propriedades de adesividade dos concretos asfálticos produzidos com a incorporação de Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA) como fíler. Um total de 11 misturas foram estudadas, variando-se entre elas o percentual e o tipo de resíduo adicionado. Por meio da metodologia *Marshall*, determinou-se o teor de ligante de projeto das misturas em estudo. Para caracterização mecânica das misturas foram realizados ensaios de estabilidade e fluência *Marshall* e resistência à tração por compressão diametral. As propriedades de adesividade das misturas asfálticas foram avaliadas pelos ensaios de desgaste Cântabro e dano por umidade (Ensaio de *Lottman* Modificado). Os resultados mostram que a adição dos resíduos como fíler em concreto asfáltico mantém tanto os parâmetros volumétricos como o comportamento mecânico das misturas com utilização dos resíduos industriais praticamente inalterados quando comparados à mistura de referência e que atendem aos requisitos das especificações vigentes do DNIT. Conclui-se, portanto, que a utilização de resíduos industriais em misturas asfálticas se apresenta como uma alternativa promissora para reaproveitamento dos rejeitos estudados.

Palavras-chave: mistura asfáltica; fíler; resíduos industriais

ABSTRACT

Gottardi, E. V. **Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória moída de aciaria como fíler em pavimentos de concreto asfáltico.** 2015.106 f. trabalho de diplomação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo.

The State of the Espírito Santo has the most complex pelletizing iron ore in the world and it is the largest producer of steel plates. It is also the largest exporter of marble and granite in Latin America. The state leads the national extraction of ornamental marble and granite, accounting for 39% of Brazilian exports of ornamental and for 50% of marble slabs benefited. In contrast, the state produces a large volume of industrial wastes such as steel slag and waste processing of ornamental stones. Many scientific papers have studied ways to employ these residues in roadways. Given the above, this paper aims to contribute to this issue by assessing the mechanical behavior and the adhesion properties of asphalt concrete produced with the incorporation of Waste Processing Ornamental Rocks (RBRO) and Crushed Slag Steelmaking (EMA) as fillers. A total of 11 blends were studied, varying the proportion and type of residue added. By the *Marshall* Design method, it was determined the binder content of the mixtures in study. For mechanical characterization of the mixtures, it was performed *Marshall* stability tests and creep and indirect tensile strength by diametral compression. The adhesion properties of asphalt mixtures were evaluated by wear Cantabria and moisture induced damage (Modified *Lottman* test). The results showed that the addition of residues in asphalt concrete keeps both the volumetric and mechanical parameters, since the mixtures using industrial waste practically did not change those parameters compared to the reference mixture and also they meet the requirements of current specifications of DNIT. Therefore, it was concluded that the use of industrial waste in asphalt mixtures can be a promising alternative for reuse of the studied residues.

Keywords: Asphalt mixtures; filler; industrial waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 : Principais técnicas para retiradas dos blocos | 11 |
| Figura 2-2 : Processo de serragem de blocos a partir de um tear multilaminas. | 12 |
| Figura 2-3 : Preparação de um tear multilaminas, destacando o correto posicionamento dos blocos. | 12 |
| Figura 2-4 : Detalhe da aspersão da polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional | 13 |
| Figura 2-5 : Corte de chapas por meio de tear multifio diamantado..... | 14 |
| Figura 2-6: Ilustração do multifios diamantados. | 14 |
| Figura 2-7: Tanques de Sedimentação de Lama(a) e Reservatório de Água(b)..... | 15 |
| Figura 2-8 : Filtro prensa (a) e Lama obtida pós prensagem (b). | 16 |
| Figura 2-9 : Regionalização da produção de aço bruto no Brasil (IAB, 2013)..... | 17 |
| Figura 2-10 : Basculamento da Escória nas baias. | 20 |
| Figura 2-11 : Resfriamento da Escória. | 20 |
| Figura 2-12 : Planta de britagem e peneiramento. | 21 |
| Figura 2-13: Umectação da Escória. | 22 |
| Figura 2-14 : Homogeneização da Escória. | 23 |
| Figura 2-15 : Estoque de Acerita®. | 23 |
| Figura 2-16 : Ilustração esquemática e exemplo de compactador giratório Superpave (CGS). | 35 |
| Figura 2-17 : Exemplo de equipamento para ensaio de RT. | 37 |
| Figura 2-18 : Exemplo de aparelho de abrasão Los Angeles utilizado para o ensaio Cântabro. | 38 |
| Figura 2-19 : Passos para o condicionamento e para a determinação da RT. | 39 |
| Figura 2-20 : (a) trinca isolada transversal, (b) trinca isolada – longitudinal, (c) trinca interligada – tipo jacaré e (d) trinca interligada – tipo bloco | 42 |
| Figura 2-21 : (a) afundamento de trilha de roda, (b) ondulação, (c) escorregamento e (d) exsudação. | 43 |
| Figura 2-22 : (a) panela/buraco, (b) desgaste. | 45 |
| Figura 3-1 : Sequência de atividades e de ensaios realizados na fase experimental da pesquisa | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 3-2 : Amostra do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais..... | 49 |
| Figura 3-3 : Amostra de Escória Moída de Aciaria..... | 50 |
| Figura 3-4 : Amostra de Cal..... | 50 |
| Figura 3-5 : Amostras de Brita 1 (a) e Brita 0 (b)..... | 51 |
| Figura 3-6 : Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica..... | 55 |
| Figura 3-7 : Exemplo de gráfico utilizado para determinação do teor ótimo de CAP..... | 57 |
| Figura 3-8 : Ensaio para Determinação da Estabilidade e Fluência Marshall (a) prensa Marshall e (b) execução da Mistura..... | 60 |
| Figura 3-9 : Ensaio de Resistência à Tração (RT) (a) pórtico (b) ruptura do corpo de prova..... | 60 |
| Figura 3-10 : Ensaio de Lottman modificado (a) bomba a vácuo (b) saturação dos corpos de prova (c) congelamento..... | 61 |
| Figura 3-11 : Ensaio de Desgaste Cântabro (a) Tambor de desgaste (b) visualização dos corpos de Prova antes e depois (c) corpos de prova após ensaios..... | 63 |
| Figura 4-1 : Curva granulométrica dos agregados naturais..... | 65 |
| Figura 4-2 : Diâmetro das partículas do RBRO..... | 69 |
| Figura 4-3 : Diâmetro das partículas de EMA..... | 69 |
| Figura 4-4 : Diâmetro das partículas da Cal..... | 70 |
| Figura 4-5 : Características mineralógicas das partículas de RBRO..... | 71 |
| Figura 4-6 : Características mineralógicas das partículas da EMA..... | 71 |
| Figura 4-7 : Características mineralógicas das partículas da Cal..... | 71 |
| Figura 4-8 : Enquadramento da mistura de referência na faixa C do DNIT..... | 77 |
| Figura 4-9 : Enquadramento da mistura com 2%de Cal ou Resíduo na faixa C do DNIT..... | 78 |
| Figura 4-10 : Enquadramento da mistura com 3% de Resíduo na faixa C do DNIT..... | 79 |
| Figura 4-11 : Enquadramento da mistura com 4% de Resíduo na faixa C do DNIT..... | 80 |
| Figura 4-12 : Enquadramento das misturas 0%, 2%, 3% e 4% na faixa C do DNIT..... | 81 |
| Figura 4-13 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura de referência..... | 82 |
| Figura 4-14 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de Cal..... | 83 |
| Figura 4-15 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de RBRO..... | 83 |
| Figura 4-16 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 3% de RBRO..... | 84 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4-17 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 4% de RBRO..... | 85 |
| Figura 4-18 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de EMA. | 85 |
| Figura 4-19 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 3% de EMA. | 86 |
| Figura 4-20 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 4% de EMA. | 87 |
| Figura 4-21 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de RBRO/EMA. | 87 |
| Figura 4-22 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 3% de RBRO/EMA. | 88 |
| Figura 4-23 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 4% de RBRO/EMA. | 89 |
| Figura 4-24 : Teores Ótimos de ligante de projeto para as misturas estudadas. | 90 |
| Figura 4-25 : Variação da estabilidade Marshall em função do percentual de resíduo na mistura. | 92 |
| Figura 4-26 : Variação da Fluência em função do percentual de resíduo na mistura. | 93 |
| Figura 4-27 : Valores de RT em função do percentual de resíduos na mistura. | 94 |
| Figura 4-28 : Valores do Desgaste em função do percentual de resíduos na mistura..... | 99 |
| Figura 4-29 : Valores de RRT em função do percentual de resíduos na mistura..... | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2-1 : Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil (IBS, 1998) | 19 |
| Tabela 2-2 : Composições das escórias de aciaria elétrica (Pereira, 1994* apud Masuero et al., 2000)..... | 19 |
| Tabela 2-4 : Granulometria para filer conforme DNIT. | 24 |
| Tabela 2-5 : Granulometria para filer conforme ASTM..... | 24 |
| Tabela 3-1 : Ensaio e normas utilizados na caracterização do agregado graúdo. | 53 |
| Tabela 3-2 : Ensaio e normas utilizados na caracterização do agregado miúdo. | 53 |
| Tabela 3-3 : Ensaio e normas utilizados na caracterização dos fileres. | 54 |
| Tabela 3-4 : Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura..... | 54 |
| Tabela 3-5 : Faixas Granulométricas do concreto asfáltico do DNIT ES - 031/2006 (DNIT, 2006)..... | 56 |
| Tabela 3-6 : Parâmetros de dosagem de concreto asfáltico do DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a)..... | 58 |
| Tabela 3-7 : Quantitativos dos Corpos de prova para determinação dos teores ótimos de CAP. | 58 |
| Tabela 3-8 : Quantitativos dos corpos de prova para caracterização mecânica das misturas asfálticas..... | 59 |
| Tabela 4-1 : Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados. | 66 |
| Tabela 4-2 : Massa específica real dos agregados naturais utilizados na pesquisa. | 66 |
| Tabela 4-3 : Resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles realizados com a brita 19,0 mm..... | 67 |
| Tabela 4-4 : Resultados da caracterização do CAP utilizado na pesquisa. | 68 |
| Tabela 4-5 : Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura..... | 73 |
| Tabela 4-6 : Faixas Granulométricas do concreto asfáltico do DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a)..... | 75 |
| Tabela 4-7 : Parâmetros de dosagem de concreto asfáltico do DNIT ES - 031/2006..... | 75 |
| Tabela 4-8 : Valores de Vazios do Agregado Mineral DNIT ES - 031/2006 (DNIT, 2006a). . | 76 |
| Tabela 4-9 : Distribuição granulométrica da mistura de referência. | 76 |
| Tabela 4-10 : Distribuição granulométrica das misturas com 2% de Cal ou Resíduo..... | 77 |
| Tabela 4-11 : Distribuição granulométrica das misturas com 3% de Resíduo. | 78 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4-12 : Distribuição granulométrica das misturas com 4% de Resíduo. | 79 |
| Tabela 4-13 : Composição das onze misturas estudadas. | 80 |
| Tabela 4-14 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura de Referência. | 82 |
| Tabela 4-15 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de Cal. | 82 |
| Tabela 4-16 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de RBRO. | 83 |
| Tabela 4-17 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 3% de RBRO. | 84 |
| Tabela 4-18 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 4% de RBRO. | 84 |
| Tabela 4-19 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de EMA. | 85 |
| Tabela 4-20 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 3% de EMA. | 86 |
| Tabela 4-21 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 4% de EMA. | 86 |
| Tabela 4-22 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de RBRO/EMA. ... | 87 |
| Tabela 4-23 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 3% de RBRO/EMA. ... | 88 |
| Tabela 4-24 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 4% de RBRO/EMA. ... | 88 |
| Tabela 4-25 : Teor de ligante de projeto. | 89 |
| Tabela 4-26 : Estabilidade das Misturas no Ponto Ótimo. | 91 |
| Tabela 4-27 : Fluência das Misturas no Ponto Ótimo. | 92 |
| Tabela 4-28 : Resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral. ... | 94 |
| Tabela 4-29 : Desgaste Cântabro Antes do Ensaio. | 96 |
| Tabela 4-30 : Desgaste Cântabro Após o Ensaio. | 97 |
| Tabela 4-31 : Resultados dos ensaios de desgaste Cântabro. | 98 |
| Tabela 4-32 : Resistência à Tração por Compressão Diametral Condicionado. | 100 |
| Tabela 4-33 : Resistência à Tração Compressão Diametral Não Condicionado. | 100 |
| Tabela 4-34 : Resultados da relação de resistência a tração (RRT). | 101 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|--|
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABPv | Associação Brasileira de Pavimentação |
| ANP | Agência Nacional de Petróleo |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CAP | Cimento Asfáltico de Petróleo |
| CBUQ | Concreto Betuminoso Usinado a Quente |
| CGS | Compactador Giratório <i>Superpave</i> |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente |
| CP | Corpo-de-prova |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte |
| ECA | Ensaio de Efeito do Calor e do Ar |
| FHWA | Federal Highway Administration |
| IME | Instituto Militar de Engenharia |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| NCHRP | National Cooperative Highway Research Program |
| PETROBRAS | Petróleo Brasileiro S/A |
| OPEP | Organização dos Países Exportadores de Petróleo |
| PGRS | Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos |
| PNMA | Política Nacional de Meio Ambiente |
| PNRS | Plano Nacional de Resíduos Sólidos |
| SHRP | Strategic Highway Research Program |
| SUPERPAVE | Superior Performance Asphalt Pavements |

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

| | |
|------|---|
| DMM | Densidade Máxima Medida |
| DMT | Densidade Máxima Teórica |
| g | Grama |
| IDML | Índice de Degradação de Rochas após Compactação <i>Marshall</i> , com Ligante |
| IDM | Índice de Degradação de Rochas após Compactação <i>Marshall</i> , sem Ligante |
| Hz | Hertz |
| kg | Quilograma |
| kgf | Quilograma-força |
| kPa | Quilopascal |
| MPa | Megapascal |
| MR | Módulo de Resiliência |
| N | Número de passadas do eixo padrão simples em uma só direção; Número de aplicações de carga |
| Nf | Vida de fadiga |
| °C | Grau Celsius |
| P | Poise |
| RBV | Relação Betume-Vazios |
| rpm | Rotações por minuto |
| RT | Resistência à Tração por compressão diametral |
| VAM | Vazios no Agregado Mineral |
| Vv | Volume de Vazios |

Sumário

| | | |
|---------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 2 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA E REFERÊNCIA..... | 2 |
| 1.2 | OBJETIVO GERAL | 3 |
| 1.3 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 1.4 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO..... | 5 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 7 |
| 2.1 | RESÍDUOS SÓLIDOS..... | 7 |
| 2.1.1 | RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS | 9 |
| 2.1.2 | ESCÓRIA DE ACIARIA | 16 |
| 2.2 | O FÍLER NAS MISTURAS ASFÁLTICAS..... | 24 |
| 2.3 | MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS | 28 |
| 2.4 | MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO ASFÁLTICO | 32 |
| 2.4.1 | Dosagem <i>Marshall</i> | 33 |
| 2.4.2 | Dosagem <i>Hveem</i> | 34 |
| 2.4.3 | Dosagem <i>SUPERPAVE</i> | 34 |
| 2.5 | CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS | 35 |
| 2.5.1 | Resistência à tração | 36 |
| 2.5.2 | Desgaste | 37 |
| 2.5.3 | Susceptibilidade à água..... | 38 |
| 2.6 | DEFEITOS DE SUPERFÍCIE NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS | 40 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS | 47 |
| 3.1 | MATERIAIS..... | 48 |
| 3.1.1 | Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) | 48 |
| 3.1.2 | Escória Moída de Aciaria (EMA)..... | 49 |
| 3.1.3 | Cal | 50 |
| 3.1.4 | Agregados Minerais Naturais | 51 |
| 3.1.5 | Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) | 52 |
| 3.2 | MÉTODOS | 53 |
| 3.2.1 | Caracterização física dos Agregados Graúdo e Miúdo..... | 53 |
| 3.2.1.1 | Agregados Graúdos – Brita 1, Brita 0 e Granilha | 53 |
| 3.2.1.2 | Agregado Miúdo – Pó de Pedra | 53 |
| 3.2.2 | Caracterização dos Fíleres – Cal, RBRO e EMA..... | 53 |
| 3.2.3 | Dosagem <i>Marshall</i> | 54 |
| 3.2.4 | Caracterização mecânica das misturas asfálticas e avaliação das propriedades de adesividade | 58 |
| 3.2.4.1 | Estabilidade <i>Marshall</i> | 59 |
| 3.2.4.2 | Ensaio de Tração por Compressão Diametral..... | 60 |
| 3.2.4.3 | Ensaio de <i>Lottman</i> modificado | 61 |
| 3.2.4.4 | Ensaio de Desgaste por Abrasão Cântabro | 62 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 65 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS | 65 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.1.1 | Agregados Naturais – Brita 1, Brita 0, Granilha e Pó de pedra | 65 |
| 4.1.1.1 | Análise Granulométrica | 65 |
| 4.1.1.2 | Massas Específicas..... | 66 |
| 4.1.1.3 | Desgaste por Abrasão <i>Los Angeles</i> e Equivalente de Areia | 67 |
| 4.2 | CARACTERÍSTICA FÍSICA E REOLÓGICA DO LIGANTE | 68 |
| 4.3 | CARACTERIZAÇÃO DA CAL E DOS RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (RBRO) E ESCÓRIA MOÍDA DE ACIARIA (EMA) 69 | |
| 4.3.1 | Granulometria | 69 |
| 4.3.2 | Análise Mineralógica..... | 70 |
| 4.3.3 | Massa Específica Real | 72 |
| 4.3.4 | Determinação da Finura pelo Método da Permeabilidade ao Ar | 72 |
| 4.4 | PARAMETROS DA DOSAGEM <i>MARSHALL</i> | 73 |
| 4.4.1 | Composição das Misturas | 74 |
| 4.4.2 | Determinação dos Teores Ótimos de CAP nas Misturas Asfálticas | 81 |
| 4.5 | CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS..... | 91 |
| 4.5.1 | Estabilidade e Fluência do Ensaio <i>Marshall</i> | 91 |
| 4.5.2 | Resistência à tração por compressão diametral..... | 93 |
| 4.5.3 | Desgaste de misturas betuminosas por abrasão – ensaio Cântabro..... | 95 |
| 4.5.4 | Efeito deletério da água..... | 99 |
| 5 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS..... | 104 |
| 5.1 | CONCLUSÕES | 104 |
| 5.1.1 | Quanto à caracterização dos resíduos | 104 |
| 5.1.2 | Quanto à dosagem <i>Marshall</i> das misturas asfálticas..... | 104 |
| 5.1.3 | Quanto à caracterização mecânica e a adesividade das misturas | 105 |
| 5.1.4 | Considerações finais | 106 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA..... | 108 |
| 6.1 | BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA | 108 |
| 6.2 | BIBLIOGRAFIA CONSULTADA..... | 115 |
| 6.3 | BIBLIOGRAFIA DE NORMAS E PROCEDIMENTOS..... | 117 |

Capítulo 1

O único lugar que Sucesso vem antes de Trabalho é no Dicionário.

Albert Einstein

1. INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E REFERÊNCIA

O Estado do Espírito Santo tem o maior complexo de pelotização de minério de ferro do mundo e é o maior produtor nacional de placas de aço. É, além disso, o maior exportador de mármore e granito da América Latina. O estado lidera a extração nacional de mármore e granito ornamentais, sendo responsável por 39% das exportações brasileiras de rochas ornamentais e por 50% de placas de mármore beneficiadas, de acordo com o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC, 2007). Em contrapartida, o estado produz um grande volume de rejeitos industrial tais como escória de aciaria e resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais.

A utilização de rejeitos industriais vem ganhando cada vez mais aceitação da comunidade técnica, visto que vários estudos têm comprovado a viabilidade do uso de subprodutos em substituição de agregados naturais. Assim, tem-se um ganho ambiental tanto pela minimização da extração de agregados naturais como pela não disposição de rejeitos em áreas impróprias. Nos últimos anos vários estudos foram feitos para incorporar uma grande variedade de resíduos de materiais em pavimentos de concreto asfáltico. Dentre os vários tipos de resíduos gerados por diferentes polos de produção industrial, podemos citar os seguintes tipos utilizados em pavimentação: resíduos industriais tais como resíduos de escórias (CASTELO BRANCO, 2004; TAVARES *et al.*, 2011), cinzas volantes (DIAS, 2004); resíduos municipais e domésticos tais como incineração os resíduos (CASAGRANDE *et al.*, 2012), resíduos de pneu (PINHEIRO *et al.*, 2008; SPECHT, 2004), resíduos de vidro (LUCENA *et al.*, 2008); resíduos de mineração, como o resíduo de mármore e granito (FERNANDES, 2007).

A produção de aço no estado gera grande quantidade de resíduos que necessitam de uma destinação adequada para mitigação do impacto da atividade industrial. A escória de aciaria é um subproduto da produção do aço que já vem sendo utilizado de várias formas inclusive na infra e superestrutura rodoviária. Sua geração é de cerca de 12,0%

a 16,0% em massa da produção de aço mundial. No Brasil, cada tonelada de aço produz entre 70 e 170 kg de escória de aciaria e por ano são produzidas mais de 4 milhões de toneladas deste material (CASTELO BRANCO, 2004).

O sistema de desdobramento de blocos de granito para a produção de chapas gera uma quantidade significativa de rejeitos na forma de lama, que corresponde de 20 a 25% dos blocos, geralmente constituída de água, de gralha, de cal e rocha moída, que após o processo de beneficiamento são lançadas no meio ambiente em forma de rejeito, ocupando espaços ao ar livre. O resíduo de granito é um rejeito que pode ser utilizado desde a fabricação de telhas e blocos cerâmicos, argamassas e concretos (FERNANDES, 2007).

O resultado das grandes quantidades de escórias de aciaria e resíduos de granito produzidos e seu impacto potencial sobre o meio ambiente levaram cientistas e engenheiros a explorar formas ambientalmente corretas e tecnicamente rentáveis para o uso aceitável destes materiais na construção civil e de estradas. Em função do grande volume de Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA) produzidos no estado do Espírito Santo, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de aplicação dos Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA) como fíler em Concreto Asfáltico (CA), por meio da substituição do fíler mineral contido no pó de pedra da mistura por esses resíduos, em um traço comercial utilizado na construção e manutenção da infraestrutura viária da cidade de Vila Velha/ES.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar tecnicamente o potencial de utilização de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória Moída de Aciaria (EMA) como fíler em misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA), no que diz respeito a influência da adição sobre algumas características volumétricas, mecânicas e a adesividade das misturas, considerando sua aplicação na camada de revestimento de pavimentos.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o atendimento do objetivo geral, deverão ser atendidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física e mineralógica do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBMO) e da Escória Moída de Aciaria (EMA) utilizados nesta pesquisa;
- Realizar a dosagem *Marshall* de misturas asfálticas com a utilização de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA) em diferentes percentuais (2%, 3% e 4%) em relação ao peso total da mistura asfáltica), determinando os teores projeto;
- Comparar os parâmetros volumétricos obtidos na dosagem *Marshall* para misturas com proporções diferentes de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA);
- Avaliar a influência do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA), nas características mecânicas e as propriedades de adesividade das misturas asfálticas por meio da realização de ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Resistência ao dano devido à umidade pelo Ensaio de *Lottman* Modificado e Desgate Cântabro;
- Comparar as características mecânicas e as propriedades de adesividade das misturas asfálticas com adição de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA), com uma mistura sem a adição de resíduos e com adição com 2% de Cal (misturas de referência), moldados de acordo com a metodologia *Marshall*;
- Determinar um percentual de Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e de Escória Moída de Aciaria (EMA), que podem ser adicionadas à mistura estudada que possam garantir ou melhorar suas características mecânicas e as propriedades da adesividade das misturas asfálticas estudadas.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em um volume, da seguinte forma:

No Capítulo 1, apresentam-se a introdução, justificativa e relevância do tema e são definidos os objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2 apresenta-se a fundamentação teórica, no qual são abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: os resíduos sólidos, os resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria, o fíler nas misturas asfálticas, os resíduos e sua utilização como fíler, tipos de dosagens de misturas asfálticas à quente, misturas asfálticas com adição de resíduos, características mecânicas e as propriedades de adesividade das misturas asfálticas e os defeitos nos pavimentos asfálticos.

São descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento desta dissertação no Capítulo 3.

No Capítulo 4 apresenta-se e analisa-se os resultados obtidos no programa experimental.

As principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras sobre esse tema são apresentadas no Capítulo 5.

Além dos capítulos anteriores, na sequência são apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

Capítulo 2

Nunca existiu uma grande inteligência sem uma veia de loucura.

Aristóteles

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No capítulo 1 fez-se a introdução do tema onde foram abordados a justificativa e referência, os objetivos gerais e específicos e a estrutura da dissertação.

Neste capítulo busca-se apresentar a fundamentação teórica onde são abordados os resíduos sólidos, o beneficiamento dos resíduos de rochas ornamentais e de escória de aciaria, o fíler nas misturas asfálticas, misturas asfálticas com adição de resíduos, métodos de dosagem do concreto asfáltico, as características mecânicas e as propriedades de adesividade das misturas asfálticas e os defeitos de superfície nos pavimentos asfálticos.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

O resíduo sólido é definido como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível NBR 10004 (ABNT, 2004).

O volume de resíduos sólidos lançados sobre o ambiente aumenta a poluição do solo, águas e ar, agrava as condições de saúde da população. O volume de resíduos tem crescido assustadoramente e uma das soluções imediatas para o caso seria reduzir ao máximo esse volume com a reutilização ou reciclagem desses materiais.

Gerenciamento de resíduos sólidos é definido como o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma da Lei 12305/2010 (BRASIL, 2010).

No Brasil a política ambiental tem como base a Constituição Brasileira em seu Artigo 225, que dispõe sobre a proteção ao meio ambiente; a Lei Federal 6.938/81, que estabelece a Política Nacional de Meio Ambiente; a Lei Federal 6.803/80, que dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial em áreas críticas de poluição; a Lei Federal nº 12.305/2010 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS); além de Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA que regulamentam as atividades e os processos produtivos considerando suas características específicas; Lei Federal 9605/1998 Lei de Crimes Ambientais, estabelecendo pesadas sanções para os responsáveis pela disposição inadequada de resíduos.

A gestão de resíduos sólidos no Brasil tem sua consolidação com a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e os instrumentos econômicos aplicáveis. A PNRS determina a ordem prioritária das ações de gestão: não geração, caso isto seja possível; redução; reutilização; reciclagem; tratamento; disposição final e institui o conceito de rejeito como sendo o resíduo, após esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, apresentando como única solução a disposição final ambientalmente adequada.

Como forma de coordenar, monitorar e fiscalizar a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos, incluindo os industriais, a União deverá elaborar o Plano Nacional de Resíduos Sólidos com horizonte de 20 anos, estabelecendo metas e prazos, com revisão a cada quatro anos. Esse plano deverá ser elaborado mediante processo de mobilização e participação social, incluindo a realização de audiências e consultas públicas. E condiciona que os Estados e Municípios deverão elaborar seus planos de gerenciamento de resíduos para ter acesso aos recursos da União ou benefícios de incentivos e financiamentos de entidades de crédito e fomento.

A PNRS institui como um dos instrumentos aplicáveis à gestão dos resíduos os Planos de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS). A elaboração de PGRS deverá ser realizada, atendendo a especificidades, pelas atividades geradoras.

No que diz respeito aos resíduos industriais, como a responsabilidade pelo gerenciamento dos Resíduos Sólidos Industriais (RSI) é do próprio gerador, a quantidade, a caracterização e o destino dos RSI gerados no Brasil são bastante indefinidos, e dos poucos geradores que possuem unidades próprias para destinação de seus resíduos, os dados não são disponibilizados para conhecimento público. O conhecimento de informações detalhadas sobre como os resíduos industriais são recebidos e tratados tornam-se essenciais para o controle, monitoramento e implementação de ações de gestão para RSI.

Essas informações deveriam constar nos Inventários de Resíduos Sólidos Industriais, cuja elaboração é prevista em Lei (CONAMA, 2002), entretanto esse instrumento não é aplicada efetivamente. O inventário prevê a informação de dados que vão desde a informação geral da indústria e as características do processo produtivo à descrição dos resíduos da geração à destinação final.

2.1.1 RESÍDUO DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

No ano de 2011, a produção mundial de rochas ornamentais somou quase 120 milhões de toneladas, com transações comerciais internacionais de aproximadamente US\$ 20 bilhões e 50 milhões de toneladas. Neste mesmo ano o Brasil colocou-se como o 4º maior produtor e 7º exportador mundial de rochas ornamentais, em volume físico; como 3º maior exportador de blocos de granito e de produtos de ardósia; como 5º maior exportador de rochas processadas especiais, na forma de chapas; e como 8º exportador de rochas processadas simples, com produtos de quartzito foliado (ABIROCHAS, 2013).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS, 2013), mais de 60% da produção de granitos, mármore, travertinos e materiais afins está concentrada na Região Sudeste, principalmente no Espírito Santo e Minas Gerais.

Mais de 90% dos investimentos do parque industrial brasileiro do setor de rochas ornamentais são realizados no estado do Espírito Santo. O estado se tornou líder absoluto na produção nacional de rochas, apresentando grande potencial geológico,

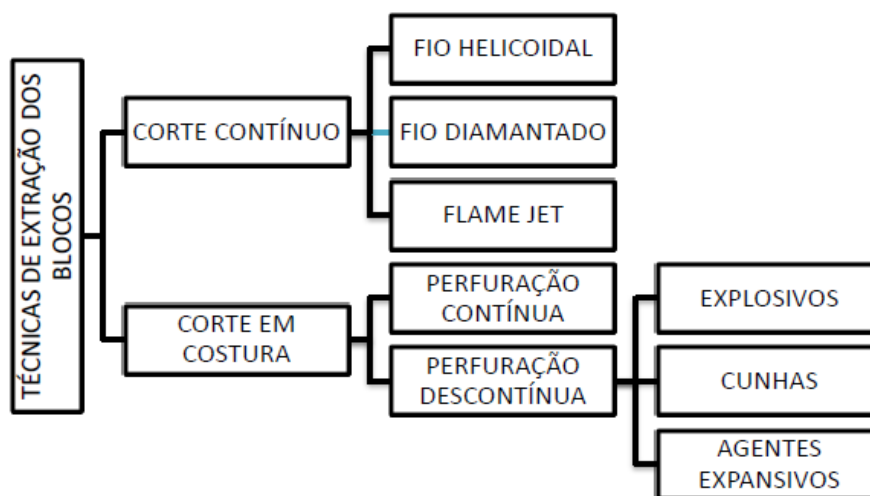
desenvolvido por meio de investimentos em pesquisas, tecnologias de extração e beneficiamento.

Em função desses investimentos, o setor estadual de rochas ornamentais gera emprego e renda para cerca de 130 mil capixabas. Atualmente o estado do Espírito Santo possui cerca de 900 teares (INFOROCHAS, 2011) em operação com capacidade de produzir cerca de 52 milhões de m² de chapas, o que representa em torno de 57% dos teares instalados no Brasil, constituindo-se no principal parque industrial do setor na América Latina. Por ano são extraídos mais de 900 mil metros cúbicos de rochas ornamentais no estado, sendo o segmento formado por dois núcleos principais, onde está localizada a maioria das empresas extratoras e beneficiadoras de mármore e granito. O primeiro núcleo se localiza em torno do polo industrial de Cachoeiro de Itapemirim, no sul do território estadual, e o segundo situa-se na região noroeste, em torno dos municípios de Nova Venécia, Ecoporanga e Barra de São Francisco.

As atividades de extração e beneficiamento das rochas ornamentais se iniciam nas lavras, onde há a extração dos blocos, ou seja, a remoção de material útil ou economicamente aproveitável dos maciços ou dos matacões que são encaminhados para o beneficiamento realizado nas serrarias. Segundo Frascá (2007), nesta etapa são usados fios diamantados, martelotes, explosivos e massas expansivas para retirada dos blocos. Nessa etapa, a extração dos blocos em dimensões ideais deve ser garantida, para melhor aproveitar o material e atender à capacidade produtiva dos equipamentos das fases posteriores. Em todas as etapas do processo, há a geração de resíduo. Nesta pesquisa, é estudado o resíduo gerado no desdobramento, ou seja, aquele proveniente do corte dos blocos em chapas somente o realizado em teares.

O beneficiamento de rochas ornamentais refere-se ao desdobramento de materiais brutos, extraídos nas pedreiras em forma de blocos, normalmente com dimensões variáveis de 5 a 10 m³. Esses blocos são beneficiados, sobretudo por meio da serragem (processo de corte) em chapas, por teares e talha-blocos, para posterior polimento, acabamento, esquadreamento até sua dimensão final. Na Figura 2.1 mostra-se as principais técnicas de retiradas de blocos.

Figura 2-1 : Principais técnicas para retiradas dos blocos



Fonte: Soares, 2014

Em função dos processos de beneficiamento a serem utilizados, pode ser obtido a partir das rochas ornamentais, os seguintes produtos: chapas, espessores e tiras a partir do beneficiamento primário, além de painéis para revestimento externo, ladrilhos para revestimento, degraus e parapeitos, meios-fios, molduras e rodapés, mesas e bancadas para decoração, colunas e produtos especiais resultantes do beneficiamento final. Os teares são mais utilizados para o corte de blocos maiores, visando à produção de chapas com 2 e 3 cm de espessura. Enquanto os talha-blocos são indicados para o corte de blocos menores, antieconômicos nos teares, na produção de chapas, tiras e ladrilhos, com cerca de 1 cm de espessura e peças com medidas superiores a 3 cm de espessura (SARDOU FILHO *et al.*, 2013).

Ainda segundo Sardou Filho *et al.* (2013), o corte com tear de lâminas se dá pela ação de um elemento abrasivo conduzido por um conjunto de lâminas movimentadas pelo tear que é formado por uma estrutura de sustentação com quatro colunas, que suportam o peso do quadro porta-lâminas Figuras 2.2 e 2.3. O processo de serragem nos teares é auxiliado pelo emprego de polpa d'água, cal e granalha de aço, despejada continuamente sobre a carga de blocos, para otimização do corte e resfriamento das lâminas de aço. Estas devem estar durante o processo de corte perfeitamente alinhadas e esticadas, com o objetivo de melhorar a retilineidade, planura e a qualidade das chapas obtidas após a serragem do conjunto de blocos colocados no tear.

Figura 2-2 : Processo de serragem de blocos a partir de um tear multilaminas.



Fonte: Sardou Filho *et al.*, 2013

Figura 2-3 : Preparação de um tear multilâminas, destacando o correto posicionamento dos blocos.



Fonte: Sardou Filho *et al.*, 2013

Figura 2-4 : Detalhe da aspersão da polpa abrasiva sobre o bloco durante o corte em um tear tradicional



Fonte: Soares, 2014

O processo de serragem de blocos pode também ser elaborado a partir de teares multifios diamantados. Os teares multifios (Figura 2.5) representam uma evolução tecnológica cuja ideia surgiu a partir do uso do fio diamantado na lavra de mármore e granitos utilizados para fins ornamentais. Tal equipamento consiste de uma estrutura metálica, a qual se dispõe de forma equidistante e com os fios diamantados tensionados, realizando um movimento circular em torno dela. Este conjunto constituído por armação e fios é suportado por duas ou quatro colunas (dependendo do modelo) que se movimentam verticalmente no sentido descendente, com os fios entrando em contato com os blocos de rocha proporcionando o seu desdobramento em chapas com espessura variando de 1 cm a 3 cm de acordo com a solicitação do mercado. Salienta-se que a tecnologia do fio diamantado quando aplicada no beneficiamento primário de blocos de rochas melhora em muito o processo produtivo da empresa que o adota, notadamente pela velocidade de operação do tear multifio, a qual é nitidamente superior ao do tear multilâminas tradicional. (SARDOU FILHO *et al.*, 2013).

Figura 2-5 : Corte de chapas por meio de tear multifio diamantado.



Fonte: Sardou Filho *et al.*, 2013

Nestes teares o elemento principal é representado pelo fio diamantado, constituído por um cabo de aço onde são fixadas pérola de diamante distanciadas entre si por um plástico ou borracha especial injetado a alta pressão. A pérola diamantada empregada pelo fio apresenta no início um diâmetro de 6,7 mm, podendo ser utilizada até atingir o diâmetro de 5,2 mm. Salienta-se que o emprego desta tecnologia tem propiciado as empresas que a utilizam uma significativa melhora no seu processo produtivo, notadamente pelo aumento de produtividade e melhoria da qualidade das chapas serradas, além de uma sensível diminuição da taxa de rejeitos gerados e da consequente redução dos custos de produção (Figura 2.6).

Figura 2-6: Ilustração do multifios diamantados.



Fonte: Guidoni Mineração, 2010

No corte do bloco para o tear de fios diamantados, usa-se uma lama (polpa abrasiva) constituída de rocha moída e água. Já no caso do tear convencional, esta lama é acrescida de cal e granalha de aço, que tem como principais finalidades: lubrificar e esfriar as lâminas de serragem; evitar a oxidação das mesmas; limpar os canais entre as chapas; e servir como abrasivo para facilitar o processo de corte. A lama re-circula no tear por meio de uma bomba submersa de eixo vertical, situada num poço (reservatório) de recolhimento que fica sob o tear, onde a lama é bombeada para cima do bloco através de um sistema de chuveiros em movimentação. Durante a serragem, a lama retorna ao poço e fica mantida em circulação até o término da serrada. Ela deve ter sua viscosidade controlada durante o processo, para isso, é feito o acréscimo de seus componentes: água, granalha e cal. A parte da lama que se torna muito viscosa é descartada e torna-se o resíduo, que em geral, é depositado em lagoas de sedimentação diretamente no solo, nos pátios das empresas (Figura 2.7a). Em algumas empresas, o resíduo passa por um equipamento chamado filtro prensa (figura 2.8a), que diminui o teor de umidade, podendo-se nesse caso, reaproveitar parte da água(Figura 2.7b), ficando o resíduo também condicionado nos pátios (Figura 2.8b).

Figura 2-7: Tanques de Sedimentação de Lama(a) e Reservatório de Água(b).



(a)



(b)

Fonte: Soares, 2014

As amostras do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) utilizados nesta pesquisa foram recolhidos depois do corte com tear de lâminas e de passarem pelo processo com filtro prensa conforme ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2-8 : Filtro prensa (a) e Lama obtida pós prensagem (b).



Fonte: Gottardi, 2012

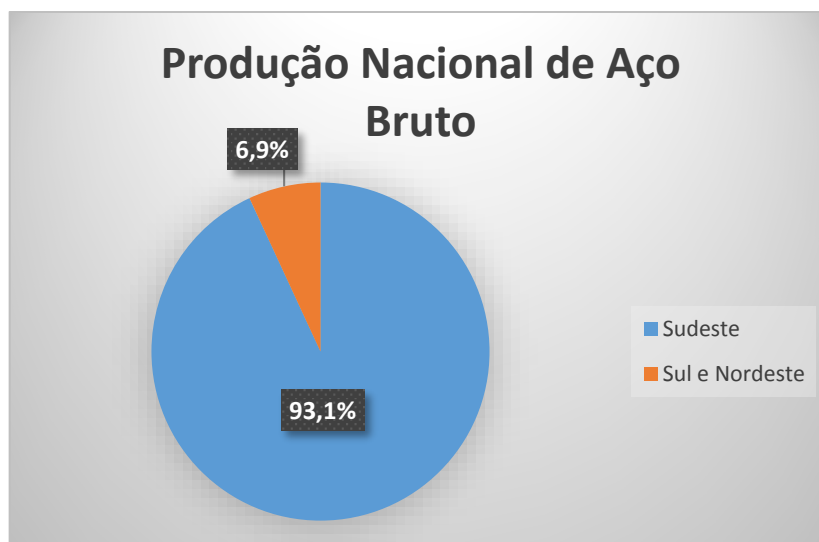
2.1.2 ESCÓRIA DE ACIARIA

Escórias siderúrgicas são produtos resultantes de processos industriais destinados a obter, em primeiro lugar, o gusa e em segundo lugar, o aço. O gusa que é o produto imediato da redução do minério de ferro pelo coque ou carvão e calcário num alto forno. O gusa normalmente contém até 5% de carbono, o que faz com que seja um material quebradiço e sem grande uso direto. O aço é uma liga metálica formada essencialmente por ferro e carbono, com percentagens deste último variando entre 0,00% e 2,11%. Distingue-se do ferro fundido, que também é uma liga de ferro e carbono, mas com teor de carbono entre 2,11% e 6,67%.

A indústria brasileira do aço foi responsável em 2013, por 2,1 % da produção mundial, permanecendo em nono lugar no ranking liderado pela China. Já na América Latina a produção brasileira correspondeu a 52,2% do total do continente no ano de 2012. A maior parte dos grupos empresariais associadas ao Instituto de Aço Brasil, em 2013,

operavam 28 usinas, sendo que a maior parte está localizada na região Sudeste, respondendo por 93,1% da produção nacional em 2013 (IAB, 2013).

Figura 2-9 : Regionalização da produção de aço bruto no Brasil (IAB, 2013).



O estado do Espírito Santo produz cerca de 20,8% da produção brasileira de aço bruto. O maior produtor de aço bruto do Brasil é o estado de Minas Gerais com 31,8% da produção do país. A regionalização da produção de aço bruto pode ser visualizada na Figura 2.9 (IAB, 2013).

A siderurgia é dividida em dois grandes ramos: a íntegra (que possui como principais matérias-primas, ferro e carvão) e a elétrica (que possui como principal matéria-prima, sucata ferrosa). A segunda é mais atuante por possuir uma matéria-prima de menor custo, mais disponível e, ainda, ser reciclável. A utilização da sucata é ainda superior porque esta apresenta melhores características mecânicas se comparada com as outras matérias-primas utilizadas no processo de produção do aço. Isto ocorre devido à maior porcentagem de elementos químicos, tais como: cobre, níquel, cromo e estanho nas sucatas que ficam presentes nas escórias (MAIA, 2002; BELGO, 2003).

Existem três grandes processos de fabricação do aço, divididos pelo processo de refino: LD (*Linz-Donawitz*) ou BOF (*Blast Oxygen Furnace*) que utiliza o conversor a oxigênio, elétrico ou EAF (*Eletric Arc Furnace*) que utiliza o forno de arco elétrico e OH (*Open Heart*) que utiliza o forno Siemens-Martin. No Brasil, são responsáveis por

cerca de 77,9%; 20,2% e 1,9% da produção de aço e consequentemente de escória, respectivamente.(MACHADO, 2000; IBS, 2002).

Os rejeitos siderúrgicos são oriundos do processo industrial para beneficiamento do aço. Dentre outros, é possível citar como rejeito da indústria do aço: escória de altoforno, pó de alto forno, lama de alto-forno, escória de dessulfuração, escória de aciaria LD, lama grossa de aciaria, lama fina de aciaria e carepa (GEYER, 2001). As escórias são os resíduos de maior geração (mais de 60,0% da geração de resíduos) neste tipo de processo. Existem dois tipos de escórias siderúrgicas produzidos em larga escala a Escória de Alto-forno e a Escória de Aciaria.

A Escória de Alto-forno é resultante da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa (obtido diretamente do alto forno, em geral com elevado teor de carbono e várias impurezas), obtidas em conversores.

A Escória de Aciaria é resultante da produção do aço. São obtidas em fornos elétricos e conversores a oxigênio, durante a conversão de sucata em aço. Estas escórias podem ser tanto oxidantes (produzida pela injeção de oxigênio no aço fundido para oxidar carbono, silício e enxofre) quanto redutoras (gerada após o vazamento da escória oxidada através da adição de óxido de cálcio - CaO e de fluorita - CaF_2 . Estes dois compostos são injetados no processo para dessulfurar o aço líquido e adicionar elementos de liga) (MACHADO, 2000).

Durante o processo de produção do aço são eliminados carbono, CaO e os íons de alumínio, silício e fósforo que tornam o aço frágil, quebradiço e difícil de ser transformado em barras (ZIEMKIEWIC, 1998). Todos estes elementos e compostos eliminados entram na composição da escória. Dentre as impurezas do processo que formarão a escória estão silicatos de cálcio (CaSiO_3), óxido de silício (SiO_2), ferrita cálcica (CaFe_2O_4), óxido de magnésio (MgO) e outros. Os altos teores de CaO e MgO livres, presentes nas escórias, são devidos ao fato de que, depois que o fósforo e o silício se oxidam, estes elementos precipitam porque ultrapassam os limites de solubilidade da escória fundida (JOHN, 2003). As composições típicas de algumas escórias de aciaria elétrica produzidas no Brasil e no mundo podem ser vistas nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2-1 : Composição da escória produzida pelo processo LD no Brasil

| Composto | CaO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO |
|----------------|--------|-------|------------------|--------------------------------|--------|-------|
| Quantidade (%) | 6 - 45 | 1 - 9 | 7 - 16 | 1 - 4 | 8 - 30 | 3 - 7 |

Fonte: IBS, 1998

Tabela 2-2 : Composições das escórias de aciaria elétrica

| País | Geração Kg/t | CaO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MnO | P ₂ O ₅ | S |
|----------|-----------------|----------------|-----|------------------|--------------------------------|-----|-----|-------------------------------|------|
| | | Percentual (%) | | | | | | | |
| Brasil | 150 | 33 | 10 | 18 | 6 | 30 | 5 | 0,9 | 0,1 |
| Japão | 127 | 40 | 4 | 25 | 5 | 19 | 7 | - | 0,06 |
| Suécia | 100 | 46 | 5 | 11 | 5 | 28 | 4 | 0,7 | - |
| EUA | 160 | 41 | 10 | 17 | 8 | 18 | 4 | 0,6 | 0,2 |
| Alemanha | 120 | 32 | 10 | 15 | 4 | 31 | 4 | 1,4 | 0,1 |
| Itália | 120 | 41 | 8 | 14 | 7 | 20 | 6 | 0,9 | 0,1 |

Fonte: Pereira, 1994* apud Masuero *et al.*, 2000

As escórias de aciaria, tanto de alto forno quanto a elétrica (NBR 5019/82), depois de beneficiadas tornam-se agregados siderúrgicos. Estes agregados são definidos como material não metálico e podem ser classificados como agregado bruto, graduado de alto forno (oriundo da escória de alto forno) ou como agregado graduado de aciaria (oriundo da escória de aciaria elétrica) (IBS, 1998).

O aço líquido e a escória resultante ficam separados dentro do conversor devido à diferença de densidade. Aproveita-se este fato para retirá-los do conversor separadamente: o aço sendo vertido em uma panela apropriada e a escória no "pote de escória" (recipiente de aço fundido que é transportado por meio de ferrovia). Entretanto no pote de escória ainda há cerca de 6% em peso de metal livre (FeO) misturado com a escória, que após o beneficiamento da escória, pode ser reaproveitado.

A Escória de utilizada nesta pesquisa foi obtida na ArcelorMittal Tubarão, que atualmente, produz cerca de 86,2 kg de escória/t aço líquido, o que resulta em aproximadamente 415.000 t/ano. A escória líquida ao ser retirada do conversor, com temperatura da ordem de 1400° C, é transportada para um pátio, denominado pátio

de escória, onde é basculada em baias previamente preparadas, conforme Figura 2.10.

Figura 2-10 : Basculamento da Escória nas baias.



Fonte: Silva e Leite, 2003

O beneficiamento consiste no resfriamento da escória e no processamento em uma planta de britagem apropriada, onde é separada a fração metálica e classificada a escória resultante em faixas granulométricas comerciais.

Figura 2-11 : Resfriamento da Escória.



Fonte: Silva e Leite, 2003

A escória para ser beneficiada precisa ser resfriada, conforme Figura 2.11. Ao ser resfriada, por choque térmico com jatos de água, ocorre uma fragmentação em blocos de escória, gerando um material denominado Escória Bruta de Aciaria. Parte desse material é comercializado pela ArcelorMittal Tubarão e recebe o nome de Escória de Aciaria LD NP, cuja granulometria varia entre 0 e 500 mm.

Após o resfriamento, parte da Escória Bruta de Aciaria LD é processada em uma planta de britagem e peneiramento, onde são separadas e classificadas tanto a fração metálica quanto a escória. Essa escória britada e separada quanto sua granulometria é comercializada pela ArcelorMittal Tubarão para diversas aplicações. A Escória de Aciaria In Natura é aquela proveniente da Aciaria e que foi britada e peneirada, mas não foi submetida a tratamento para redução da expansão. Este material em suas aplicações não pode ser confinado devido a sua expansibilidade volumétrica. A planta de britagem e peneiramento da Escória de Aciaria é mostrado da Figura 2.12.

Figura 2-12 : Planta de britagem e peneiramento.



Fonte: Silva e Leite, 2003

Desde 1999, a ArcelorMittal Tubarão realizou desenvolvimentos técnicos com o apoio de uma empresa de consultoria rodoviária, a Kaeme Empreendimentos e Consultoria Ltda, com o objetivo de corrigir o principal problema que ocorre com a utilização da Escória de Aciaria - a sua expansão pela reação dos óxidos livres.

A escória é submetida a tratamento especial para redução de expansão. Este processo consiste em "estimular" a reação dos óxidos livres (CaO e MgO) a partir de reação dos mesmos com ar e água, por umectação e aeração por 40 dias (Figura 2.13). Durante o tratamento para a redução da expansão, a escória é permanentemente monitorada por ensaios de laboratório e testes previstos pelas normas DNIT 114/2009-ES e DNIT 115/2009-ES para utilização respectivamente em sub-base e base dos pavimentos rodoviários. Ao atingir valor de expansão que atenda as normas técnicas DNER – EM 262/94 e DNER – PRO 263/94 (menor ou igual a 3%), o processo é interrompido e o material é disponibilizado para o mercado com o nome de ACERITA® - Escória de Aciaria com Redução de Expansão. O processo que permite que os óxidos livres sejam em parte inertizados, reduzindo a capacidade da escória expandir, consiste basicamente na umectação e homogeneização da Escória até que a mesma apresente uma expansão aceitável para o uso em obras rodoviárias.

Figura 2-13: Umectação da Escória.



Fonte: Silva e Leite, 2003

Figura 2-14 : Homogeneização da Escória.



Fonte: Silva e Leite, 2003

A Figura 2.14 mostra a homogeneização da Escória através do tombamento do material com a utilização de moto niveladora que movimenta material de forma a misturar escória seca com úmida. É um processo relativamente simples e muito utilizado em obras rodoviárias na confecção de aterros e camadas de pavimentos. Na Figura 2.15 mostra-se o estoque de material tratado chamado assim de ACERITA®.

Figura 2-15 : Estoque de Acerita®.



Fonte: Silva e Leite, 2003

2.2 O FÍLER NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Por definição, fíler é um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 75 µm de abertura de malha quadrada conforme DNER EM 367/97 (DNER, 1997c). Os limites para granulometria do fíler são definidos de acordo com a Tabela 2.2, e na Tabela 2.3 são apresentados os limites da norma ASTM D 242-85 (ASTM,1985).

Tabela 2-3 : Granulometria para fíler conforme DNIT.

| Abertura da Malha da Peneira (mm) | % em peso passando |
|-----------------------------------|--------------------|
| 0,42 | 100 |
| 0,18 | 95 a 100 |
| 0,075 | 65 a 100 |

Tabela 2-4 : Granulometria para fíler conforme ASTM.

| Tamanho das Partículas (µm) | % em peso passando |
|-----------------------------|--------------------|
| 600 | 100 |
| 300 | 95 a 100 |
| 75 | 75 a 100 |

Santana (1995) sugere uma definição geral para fíler: fíler é um material finamente dividido constituído de partículas minerais provenientes dos agregados graúdos e/ou miúdos empregados na mistura asfáltica, ou de outras fontes como é o caso, por exemplo, do pó calcário, cal hidratada, cimento Portland, etc., que se incorpora à mistura asfáltica para melhorar seu desempenho reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, devendo obedecer às especificações próprias onde devem estar incluídos limites para a distribuição dos tamanhos das partículas e para a plasticidade.

Segundo Al-Quadi *et al.* (2009), quando um ligante é combinado com um fíler mineral, forma-se um mastic. O mastic asfáltico é o material formado pela mistura dos finos minerais com o ligante asfáltico e esse mastic pode ser encarado como um componente da mistura asfáltica que liga os agregados, e como o componente da mistura que sofre deformação quando o pavimento é submetido ao carregamento do tráfego. As características do fíler podem influenciar as propriedades do mastic causar alterações importantes no desempenho da mistura asfáltica. O fíler influencia

o desempenho mecânico do mastique, física e quimicamente, influenciando assim no comportamento das misturas asfálticas das misturas asfálticas.

De acordo com Balbo (2007), além de material de enchimento, as adições de fíler aos concretos asfálticos, acabam por formar uma massa (CAP + fíler) denominada mastique asfáltico. Os fíleres adicionados à mistura têm a função de aumentar de viscosidade do CAP, gerando incremento do ponto de amolecimento, da estabilidade, do módulo de resiliência e da resistência, melhorando o desempenho reológico, mecânico, susceptibilidade térmica e sensibilidade à água.

Segundo Santana (1995), se o pó mineral é proveniente integralmente dos agregados graúdos e miúdos, o mesmo é então chamado de fíler natural. Quando o mesmo não existir ou for insuficiente, se obriga a usar o fíler comercial ou artificial. É sugerido para o que se tem chamado de pó mineral, a denominação de fíler granulométrico que pode ser constituído por 100% de fíler natural, por 100% de fíler artificial ou por mistura de fíler natural com fíler artificial. Sabe-se que o fíler serve de material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos, contribuindo para fechamento da mistura, modificando a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento. Em decorrência do pequeno tamanho de partícula e de suas características de superfície, o fíler age como material ativo, manifestado nas propriedades da interface fíler/cimento asfáltico. Sua adição aumenta a viscosidade do meio coesivo (resistência à deformação).

O fíler tem dois caminhos de atuação nas misturas asfálticas densas (MOTTA e LEITE, 2000). As partículas maiores do fíler são partes do agregado mineral e preencherão os vazios e interstícios dos agregados graúdos, promovendo o contato pontual entre as partículas maiores e dando maior resistência às misturas. As partículas menores do fíler se misturam com CAP, aumentando sua consistência, cimentando as partículas maiores, o que alguns autores chamam de mastique.

O trabalho de Santana (1995) discute dois pontos de vista da influência de certo tipo de fíler sobre certo tipo de asfalto, ou também chamado a influência do mastique: mastique com fíler total, assim chamado sob ponto de vista de *Celestino Ruiz*; e mastique como fíler ativo, assim denominado sob ponto de vista de *V. P. Puzinauskas*.

Segundo *Ruiz* (década de 40) em um mastique bem dosado todas as partículas do fíler ficam em suspensão no asfalto, suas partículas não se tocando, formando um mastique homogêneo (fíler agregado). Segundo *Puzinauskas* (década de 60) uma parte do fíler ainda se porta como um agregado muito fino, suas partículas se tocando, formando um esqueleto mineral, e a outra parte fica em suspensão formando um mastique (fíler ativo) (SANTANA, 1995).

Segundo Motta e Leite (2000) a percentagem do material passante na peneira n° 200 (75 μm) tem vários efeitos na densificação de uma mistura particular de agregados finos e grossos, dependendo da granulometria apresentada pelas partículas abaixo deste diâmetro (75 μm), da forma e da natureza das partículas. Abaixo da peneira n° 200 têm-se ainda uma parcela de areia fina, a seguir o silte e a argila. A graduação do material tem efeito no amolecimento ou enrijecimento da mistura.

Se a maior parte do agregado de enchimento que passa na peneira n° 200 (75 μm) é relativamente grossa (maior que 40 μm), a maior parte deste material vai cumprir a função de encher os vazios do esqueleto mineral, decrescendo o índice de vazios e alterando o teor ótimo de CAP. Se o fíler for ultrafino, com porcentagem significativa do material menor que 20 μm , e até com alguma porção menor que 5 μm , este material atuará muito mais no próprio CAP, incorporando-se ao cimento asfáltico e compondo um filme de CAP, envolvendo as partículas de agregados (MOTTA e LEITE, 2000, HARRIS e STUART, 1995).

O uso da cal hidratada como fíler possui um efeito mais significativo, em comparação como cimento ou como pó de pedra. Isso porque a cal hidratada tem em geral 80% de partículas de tamanho menor ou igual a 20 μm ; por outro lado o cimento tem uma distribuição muito mais contínua, com diâmetro médio de aproximadamente 60 μm , o pó de pedra por sua vez possui graduação mais grossa com grande proporção de partículas maiores que 40 μm .

A porcentagem de material que passa na peneira n°200 (75 μm) tem sido agora, preferencialmente, denominada “dust” (pó) justamente para acentuar a diferença de comportamento e a necessidade de distingui-la do que se denomina tradicionalmente

de fíler. Quando a porcentagem de material passante na peneira nº200 aumenta, reduzem-se os vazios no esqueleto mineral, melhora-se a graduação e a trabalhabilidade da mistura betuminosa aumenta até certo ponto. Acima deste nível, quanto maior a porcentagem passante na peneira nº200, os finos começam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas, alterando a capacidade de compactação (MOTTA e LEITE, 2000).

Segundo Motta e Leite (2000) teoricamente quando a quantidade de CAP aumenta além do índice de vazios *Rigden*, as partículas perdem o contato entre elas e a quantidade adicional de CAP promove uma lubrificação entre as partículas.

Quando a quantidade livre de CAP diminui, a rigidez da mistura aumenta. Quanto mais fino for o pó (“dust”), menor deve ser a relação fíler/CAP. O volume livre de CAP é que vai aumentar a espessura de recobrimento das partículas maiores dos agregados. A razão ou porcentagem do volume de CAP livre comparado com o volume total de CAP vai ter um efeito significativo na rigidez do mastique.

Motta e Leite (2000) estudaram o efeito de três tipos de fíleres (calcário, cimento Portland e pó de pedra) com três diferentes CAPs (CAP 20, CAP 40 e CAP 85/100). Dos fíleres estudados, o calcário apresentou o menor tamanho de partícula; o cimento Portland teve o tamanho intermediário. Foi observado que os corpos-de-prova preparados com fíler calcário, utilizando CAP 20 ou CAP 85/100, apresentaram módulos e valores de resistência à tração superior aos obtidos com os demais fíleres que apresentam granulometria mais grossa.

O resultado dos ensaios mecânicos, módulo de resiliência e resistência à tração, feitos por Motta e Leite (2000) nos corpos-de-prova acima citados demonstraram o efeito da granulometria do fíler na rigidez da mistura betuminosa. Quanto menor o tamanho de partícula do fíler, maior a incorporação do mineral no CAP, aumentando a rigidez da mistura. Se por um lado o enrijecimento melhora as propriedades relativas à resistência, a deformação permanente pode também piorar a resistência à fadiga. O uso de fíleres é importante para diminuir a desuniformidade na consistência e na suscetibilidade térmica provenientes de eventuais irregularidades na produção (ou

fornecimento) de cimentos asfálticos e na confecção da massa asfáltica (Santana, 1995).

Portanto é importante a adoção de ensaios como objetivo de determinar o tamanho das partículas de filler, ensaios estes como: distribuição dos tamanhos das partículas ou grãos por sedimentação, peneiras de menor diâmetro (#325 ou #400), por difração a laser, por microscopia, por raios X, por luz polarizada, por condutividade elétrica, entre outros.

Além de material de enchimento, as adições minerais finamente moídas aos concretos asfálticos, que ficam dispersos no CAP, acabam por formar uma massa CAP + filler denominada masticque asfáltico. Mais do que apenas preenchimento de vazios na mistura, os filleres se prestam a causar um aumento de viscosidade do CAP, o que gera incremento do ponto de amolecimento, na estabilidade, no módulo de resiliência e na resistência da mistura asfáltica, evidentemente até um dado limite de consumo dessa adição fina.

2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS

Os pavimentos rodoviários consomem grande quantidade de recursos naturais em sua construção e manutenção. A utilização de resíduos nessas obras mostrar-se como uma oportunidade de redução da extração de recursos naturais, diminuição de riscos com a destinação dos resíduos para os aterros ou áreas inadequadas, até mesmo para atender necessidades regionais de disponibilidade de materiais.

Por meio da pesquisa, pode-se valorizar o que era rejeito, e em certos casos pode-se melhorar algumas características mecânicas e as propriedades de adesividade dos materiais das camadas que formam a estrutura do pavimento. Muitos pesquisadores têm abordado esse tema em seus estudos sobre misturas asfálticas. A seguir lista-se algumas delas.

Com a modernização da tecnologia de fresagem e reciclagem de materiais, a reinserção dos elementos das camadas dos pavimentos como reforço ou em numa

camada rejuvenescida das rodovias novas ou restauradas, evita-se o descarte de materiais, que era considerado inservível, em lugares inadequados ou de alto custo de transporte.

A reciclagem de pavimento já se tornou uma solução corrente em projetos de manutenção e restauração, já previstos em especificações de serviço como a DNIT ES 033/2005 (DNIT, 2005a) e DNIT ES 034/2005 (DNIT, 2005b). Nascimento (2011), estudou a fresagem de pavimentos asfálticos que consiste na remoção total ou parcial de revestimentos deteriorados e a reciclagem que é a reutilização do material fresado in loco, por meio da aplicação de agente rejuvenescedor e reaplicação imediata da mistura no pavimento, ou pela incorporação do material fresado em misturas asfálticas juntamente com agregados novos. Sua pesquisa consistiu em estudar o comportamento físico e mecânico de seis misturas asfálticas tipo CBUQ, com percentuais de material fresado pré-estabelecidos (5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%).

Segundo o estudo, as composições granulométricas das misturas se enquadram na camada de rolamento, faixa C do DNIT. Foram determinados os teores ótimos de CAP em função do material fresado incorporado, com auxílio da metodologia de dosagem *Marshall*. A caracterização mecânica consistiu na realização de ensaios de Estabilidade *Marshall*, de Resistência à Tração, de *Lottman* Modificado e de Módulo de Resiliência. Os ensaios de RT, MR e *Lottman* também foram realizados utilizando-se o método de compactação por amassamento, da metodologia *SUPERPAVE*. A partir da análise dos resultados foi possível inferir que, das misturas estudadas, as contendo 10%, 15% e 20% de material fresado, compactadas tanto por impacto, quanto por amassamento, apresentaram-se como as mais adequadas para uso na pavimentação. O estudo concluiu que as misturas recicladas apresentaram propriedades físicas e mecânicas compatíveis com as exigências do DNIT.

A reciclagem de pneumáticos inservíveis como agregados (processo via seca) ou modificador do ligante (processo via úmida) (PATRIOTA, 2004; PINHEIRO, 2004; SPECHT, 2004). Os pneus quando descartados em áreas inadequadas geram problemas de ordem ambiental e sanitária. No entanto, para Specht *et al.* (2007a; 2007b), a adição de borracha reciclada permite a aplicação de misturas asfálticas em uma amplitude maior de temperaturas ou sob condições mais severas de tráfego,

aumenta a resistência a fadiga e a deformação plástica. Segundo Marques e da Paz (2007), que apresentam alguns processos para a reciclagem de pneus, a utilização na fabricação de asfaltos modificados, em comparação aos outros processos de reciclagem, é ainda bastante modesta. Porém, seu emprego vem crescendo em escala mundial e nacional, onde, em curto prazo, tende a se tornar a forma de destinação de maior interesse tanto comercial como ambiental. Outro tema de pesquisa importante é a reciclagem de pneumáticos inservíveis como agregados (processo via seca) ou modificador do ligante (processo via úmida) (PATRIOTA, 2004; PINHEIRO, 2004; SPECHT, 2004). Os pneus quando descartados em áreas inadequadas geram problemas de ordem ambiental e sanitária. No entanto, para Specht et al. (2007a; 2007b), a adição de borracha reciclada permite a aplicação de misturas asfálticas em uma amplitude maior de temperaturas ou sob condições mais severas de tráfego, aumenta a resistência à fadiga e à deformação plástica. Segundo Marques & da Paz (2007), que apresentam alguns processos para a reciclagem de pneus, a utilização na fabricação de asfaltos modificados, em comparação aos outros processos de reciclagem, é ainda bastante modesta. Porém, seu emprego vem crescendo em escala mundial e nacional, onde, em curto prazo, tende a se tornar a forma de destinação de maior interesse tanto comercial como ambiental para este resíduo. Em dezembro de 2008, a ANP publicou a Resolução nº 39 que estabelece as especificações dos CAP modificados por borracha moída de pneus, designados asfalto borracha, comercializados no país (ANP, 2008).

Aldigueri *et al.* (2004), Lucena (2008) e Onofre *et al.* (2009) estudaram recentemente resíduos da exploração do petróleo, como solo contaminado por vazamentos durante o transporte do óleo e cascalho contaminado de perfuração de poços, e a aplicação destes em misturas asfálticas. Aldigueri *et al.* (2004) e Onofre *et al.* (2009), que trabalharam, respectivamente, com CAUQ e Areia Asfalto Usinada a Quente (AAUQ), verificaram que o incremento crescente de solo contaminado a mistura diminui o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração, mas avaliam que há potencial para a aplicação de solo contaminado por petróleo, em determinados teores, na camada de revestimento de pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego e que essa aplicação justifica-se pelos problemas ambientais ligados ao solo contaminado.

Lucena (2008), que avaliou a utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de pavimentos, indicou a possibilidade de utilização deste resíduo em teores da ordem de 4 a 5%, com a melhoria de características mecânicas, como estabilidade e resistência à tração, para as misturas estudadas, sem que esta aplicação represente risco ao meio ambiente.

Leal *et. al.* (2010), avaliou a utilização de cinzas provenientes de incineração de resíduo sólido urbano da Usina Verde, localizada na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro, como material para pavimentação. O objetivo principal foi avaliar a viabilidade técnica do emprego das cinzas volantes em mistura asfáltica aplicadas em camadas de rolamento de pavimentos flexíveis. As cinzas volantes foram adicionadas como agregados finos, substituindo parte do pó de pedra da mistura asfáltica, faixa B do DNIT. Foi feita a caracterização dos materiais (agregados e cinzas), com baixa densidade das cinzas e alta absorção. Foram realizadas dosagens das misturas sem e com cinzas (teores de 5%, 10% e 20%), empregando compactador giratório. Foram selecionados dois ligantes convencionais (CAP 30-45 e CAP 50-70) para a confecção das misturas, sendo que os teores de ligantes para misturas com cinzas foram maiores (entre 5,6% e 7,0%) que os das misturas sem cinzas (entre 4,9% e 5,0%). O teor de CAP 50-70 foi o mais elevado (7,0%), mostrando-se inviável economicamente, provavelmente em função da alta absorção das cinzas (6,3%) e da viscosidade do CAP. Os resultados preliminares mecânicos mostram que as cinzas podem ser empregadas em misturas asfálticas. A opção foi trabalhar com as misturas com CAP 30-45, adicionando 5% e 10% de cinzas.

Freitas e Cavalcante (2010), avaliaram tecnicamente a viabilidade da aplicação do resíduo de gesso como fíler em uma mistura asfáltica densa utilizada na construção e manutenção da infraestrutura viária da cidade de Aracaju. Na pesquisa foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, ligante e do resíduo de gesso. Determinou-se o teor de ligante de projeto, de misturas enquadradas na faixa “C” do DNIT, por meio da metodologia de dosagem *Marshall*, para misturas sem gesso e com 2% desse resíduo nos agregados. Para caracterização mecânica das misturas foram moldados corpos-de-prova com os teores de ligante de projeto e realizou ensaios de estabilidade, fluência *Marshall*, resistência à tração por compressão diametral, módulo

de resiliência e vida de fadiga sob tensão controlada. Os resultados da pesquisa mostram que o concreto asfáltico com adição de gesso tende a reduzir o consumo de ligante e atende aos requisitos das especificações vigentes do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. A conclusão do trabalho indicou que a utilização de resíduo de gesso da construção civil em misturas asfálticas se apresenta como uma alternativa promissora para uma destinação ambientalmente correta deste rejeito.

Fernandes *et al.* (2008) e Lucena (2009) estudaram a adição em misturas asfálticas de resíduos de serragem de granito para uso ornamental e do processamento do caulim, mineral que é empregado na produção de tintas, plásticos, borrachas, etc. Os dois materiais possuem distribuição dos tamanhos das partículas semelhantes. Em seus estudos, os pesquisadores variaram teores dos resíduos, e verificaram que características das misturas como: estabilidade *Marshall*, resistência a tração e dano por umidade induzida atenderam as normas vigentes, e que o módulo de resiliência concorda com valores encontrados na literatura. Os autores concluíram pela aplicabilidade dos resíduos.

Castelo Branco (2004) tratou da caracterização de misturas asfálticas com utilização de escória de aciaria, subproduto da indústria siderúrgica, como agregado em CAUQ. Na pesquisa, a autora constatou a possibilidade de uso deste resíduo, requerendo adequações na metodologia de dosagem e do processo de armazenagem na siderúrgica devido à natureza, heterogeneidade, e expansibilidade do rejeito. Já Mendonça *et al.* (2008) monitoraram vias rurais de acesso a sítios, ou seja, trechos com baixo volume de tráfego, construídos com a utilização de escória de aciaria como revestimento primário e concluíram pela viabilidade técnica e econômica da solução.

2.4 MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO ASFÁLTICO

O primeiro procedimento de dosagem documentado para misturas asfálticas é conhecido como método *Hubbard-Field*. Ele foi originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia e asfalto e posteriormente modificado para aplicação em misturas com agregados graúdos (*ASPHALT INSTITUTE*, 1956). Segundo Roberts *et al.* (1996), entre 1940 e metade da década de 1990, 75% dos

departamentos de transportes norte-americanos utilizavam o método *Marshall* e 25% o método *Hveem*. A partir de então foi introduzido o método *Superpave* que vem gradativamente substituindo os outros dois. No Brasil tem-se utilizado principalmente o método *Marshall*, ou suas variações, tendo o uso do método *Superpave* sido mais restrito a pesquisas no âmbito das universidades do país (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.4.1 Dosagem *Marshall*

A metodologia *Marshall* foi desenvolvida na década de 40 por Bruce *Marshall*, do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi (EUA). O método de dosagem *Marshall* de misturas asfálticas, conforme DNER-ME 043/95 (DNER, 1995a), ainda é o mais utilizado no país. Foi concebido no decorrer da 2ª Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares.

A moldagem dos corpos-de-prova na metodologia *Marshall* é realizada por impacto (golpes) de um compactador que pode ser manual ou automatizado, sendo que este último garante maior uniformidade nos resultados pela manutenção da frequência e da direção de aplicação dos golpes.

Apesar de a metodologia *Marshall* ser contestada por alguns autores, em virtude da dispersão de seus resultados, principalmente nos valores de estabilidade e fluência, e do confinamento do corpo-de-prova na determinação da estabilidade, que não representa modos de ruptura da mistura no campo, e da forma de compactação, que não é a mesma do campo, a dosagem *Marshall* é um dos procedimentos mais utilizados para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas no Brasil, fazendo inclusive parte da atual especificação de concretos asfálticos DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a), devido à sua simplicidade e baixo custo dos equipamentos.

A norma DNER-ME 43/95 (DNER, 1995a), que trata do método de dosagem *Marshall*, recomenda o esforço de compactação de 50 golpes para a pressão de pneu até 7Kgf/cm², e de 75 golpes para a pressão de 7Kgf/cm² a 14 Kgf/cm². Não há, na norma, nenhuma recomendação com relação à frequência de aplicação dos golpes. Esse

aspecto se verifica também na norma *ASTM D 5581* (ASTM, 2001), assim como nas especificações da AASHTO referentes ao método *Marshall* (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.4.2 Dosagem *Hveem*

A metodologia *Hveem* foi criada por *Francis Hveem*, engenheiro de Materiais e Pesquisa do Departamento de Transporte (DOT) da California (EUA).

Neste método a dosagem da mistura asfáltica é realizada em função dos parâmetros volumétricos e estabilidade. Apesar da compactação pulsante e a estabilidade *Hveem* serem consideradas vantagens do método, os equipamentos utilizados (compactador e o estabilômetro), são mais caros que o equipamento *Marshall*, além de serem difíceis de transportar, dificultando o controle da mistura em campo (NASCIMENTO, 2011).

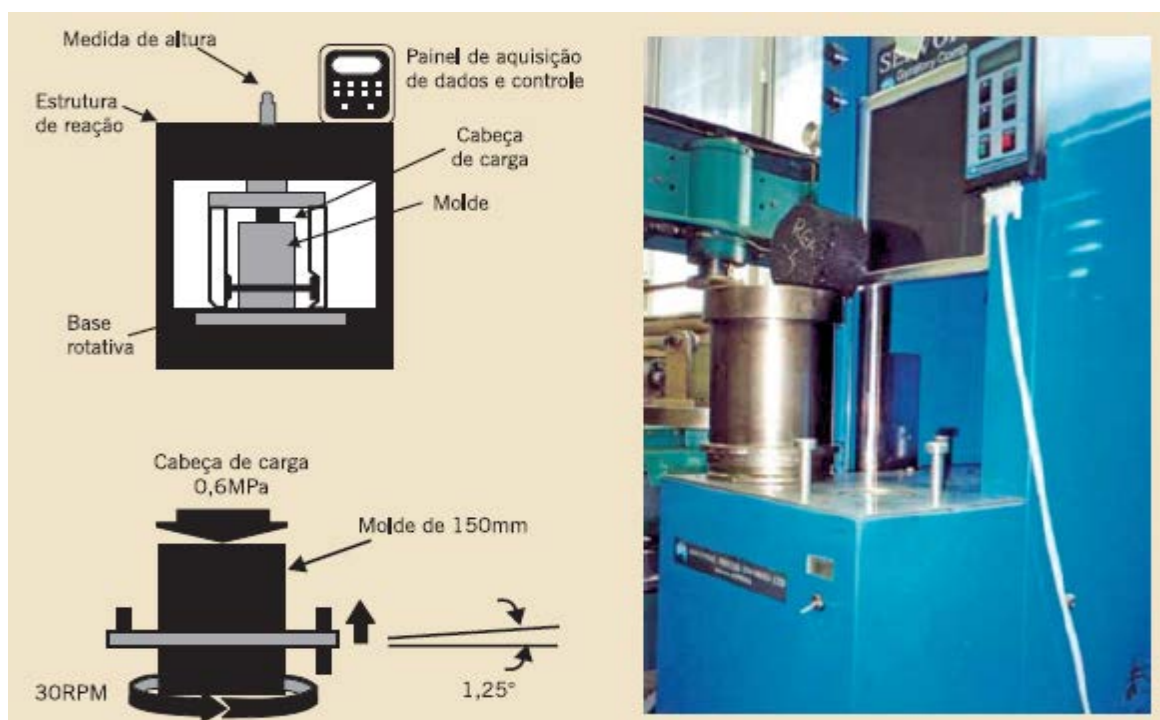
2.4.3 Dosagem *SUPERPAVE*

A maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos Estados Unidos entre 1940 e 1990 foi dosada utilizando a metodologia *Marshall* ou *Hveem* (Roberts *et al.*, 1996). Desde 1993, porém, as universidades e departamentos de transporte norte-americanos vêm utilizando a metodologia *SUPERPAVE*, ainda em fase de testes no Brasil. Na pesquisa do *Strategic Highway Research Program* (SHRP) várias mudanças foram realizadas. Foi proposta uma metodologia distinta que consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto por meio da fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis.

A maior diferença entre este novo procedimento e o *Marshall* é a forma de compactação, pois enquanto na dosagem *Marshall*, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem *Superpave* é realizada por amassamento (giros). Outra diferença que pode ser citada entre os dois processos é a forma de escolha da granulometria da mistura de agregados. A metodologia *Superpave* incluiu os conceitos de pontos de controle e zona de restrição. Teoricamente, pareceria razoável que a melhor graduação para os agregados nas misturas asfálticas fosse aquela que fornecesse a graduação mais densa. A graduação com maior densidade acarreta uma

estabilidade superior por meio de maior contato entre as partículas e reduzidos vazios no agregado mineral. Porém, é necessária a existência de um espaço de vazios tal que permita que um volume suficiente de ligante seja incorporado. Isto garante durabilidade e ainda permite algum volume de vazios na mistura para evitar exsudação (BERNUCCI *et al.*, 2006). Na Figura 2.16 mostra-se a ilustração esquemática e exemplo de compactador giratório SUPERPAVE (CGS).

Figura 2-16 : Ilustração esquemática e exemplo de compactador giratório *Superpave* (CGS).



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006

2.5 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E PROPRIEDADES DE ADESIVIDADE DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Os defeitos que surgem nos revestimentos asfálticos de pavimentos, e que são considerados no cálculo do indicador de desempenho funcional da norma brasileira que trata do assunto são: as fendas, afundamentos, ondulações ou corrugações, exsudação, desgaste, panela ou buraco e o remendo. Além desses, outros defeitos podem estar presentes e podem ser detectados, como por exemplo: falha do bico espargidor nas camadas de imprimação, na última camada granular ou na ligação entre o binder e a capa; polimento dos agregados; bombeamento de finos; desnível

entre pista e acostamento; marcas na superfície; e elevações provocadas por raízes de árvore (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Faz-se necessária, portanto, a previsão do desempenho das misturas asfálticas em campo, tanto para subsidiar o dimensionamento das camadas do pavimento, quanto para garantir a integridade do revestimento durante sua vida de serviço. Apesar da caracterização em laboratório ser uma tarefa complexa, devido à dependência de fatores como: variáveis da execução dos serviços em campo, e o histórico do carregamento e da ação do clima durante a vida de serviço, a análise estrutural dos pavimentos, que também é subsidiada por ensaios laboratoriais de caracterização mecânica, compara seus resultados com critérios predefinidos a fim de evitar o surgimento de defeitos (BERNUCCI *et al.*, 2006). A seguir são descritos os ensaios mecânicos utilizados na caracterização das misturas asfálticas analisadas nesta pesquisa.

2.5.1 Resistência à tração

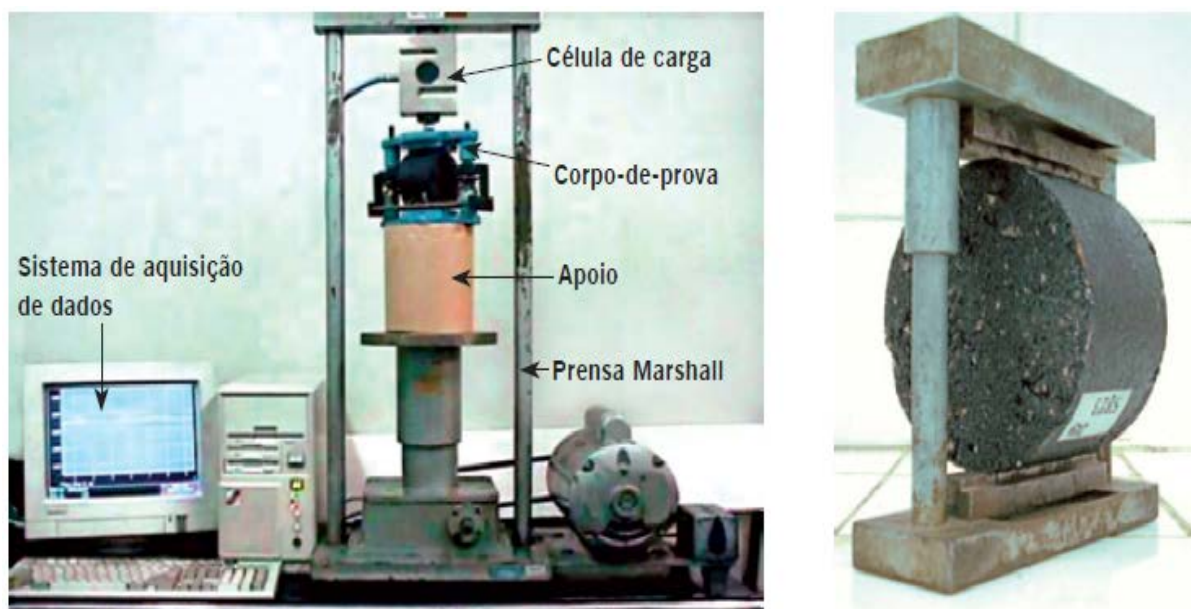
Resistência à tração é a medida do esforço solicitante, registrado sobre o material no instante da ruptura (BALBO, 2007). O ensaio de resistência a tração por compressão diametral, ou tração indireta, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Lobo Carneiro, ex-professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em 1943, para determinar a resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento Portland por meio de solicitação estática. Esse indicador tem sido usado nas especificações de concreto asfáltico dos órgãos rodoviários brasileiros DNIT 031/2006 (DNIT, 2006a) e para verificação da resistência à tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico no dimensionamento empírico-mecanístico de pavimentos. Cabe ressaltar que, com o envelhecimento do revestimento, as misturas asfálticas aumentam sua resistência a tração, no entanto, mas perdem flexibilidade, diminuindo sua resistência à fadiga (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A resistência à tração por compressão diametral é determinada por meio do método DNER ME 138/94 (DNER, 1994d). Este ensaio é realizado em corpos-de-prova

cilíndricos, moldados em laboratório ou extraídos do campo, e consiste na aplicação de uma carga de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes, por meio de frisos de carga curvos, com 1,27 cm de largura, em posições diametralmente opostas do CP, a temperatura definida.

O esforço que o corpo-de-prova é submetido gera uma tensão de tração, perpendicular à direção da aplicação da força e da maior direção do friso que distribui a carga no corpo-de-prova, ou seja, gera um estado de tensões biaxial, sendo de compressão na direção vertical e de tração na horizontal. Um exemplo de equipamento para ensaio de Resistência a tração são mostrados na Figura 2.17.

Figura 2-17 : Exemplo de equipamento para ensaio de RT.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006

2.5.2 Desgaste

No revestimento asfáltico, o desgaste, ou desagregação, ocorre após o desprendimento de agregados da superfície, ou ainda da perda de masticado junto aos agregados. Esse defeito caracteriza-se pela aspereza superficial anormal. As causas prováveis são a perda de coesão entre agregado e ligante devido à presença de material desconhecido no momento da construção ou presença de água no interior do revestimento que originam uma elevação das pressões hidrostáticas capazes de

provocar o descolamento da película betuminosa (BERNUCCI *et al.*, 2006; PINTO e PREUSSLER, 2002).

O ensaio Cântabro, de origem espanhola, permite avaliar o desgaste por efeito da abrasão provocada pelo tráfego nos revestimentos e como parâmetro para a avaliação da coesão, da resistência a abrasão e a degradação de misturas asfálticas. Foi idealizado para misturas drenantes ou porosas. De fácil execução, o ensaio consiste em submeter um corpo-de-prova cilíndrico ao desgaste provocado por 300 rotações do tambor do equipamento de abrasão *Los Angeles* sem as esferas. A relação entre o peso de material que se desprende do corpo-de-prova e o peso inicial do corpo-de-prova, expresso em porcentagem, é o valor do desgaste Cântabro. A Figura 2.18, mostra-se um exemplo de aparelho de abrasão *Los Angeles* utilizado para o ensaio de desgaste Cântabro.

Figura 2-18 : Exemplo de aparelho de abrasão *Los Angeles* utilizado para o ensaio Cântabro.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006

2.5.3 Suscetibilidade à água

Além da ação do carregamento provocado pelo tráfego dos veículos, os efeitos do clima, e em especial, o contato com a água e os níveis e variações de temperatura,

são agentes importantes no processo de degradação dos pavimentos, e principalmente do revestimento, quanto à aderência entre os materiais que o constituem, afetando o seu desempenho e vida de serviço. No Brasil, a prática de avaliação da adesividade entre os materiais que constituem a mistura adota ensaios de determinação visual da interação do ligante com os agregados graúdos e miúdos.

Furlan (2006) pesquisou a perda de adesão de misturas asfálticas densas por ação da água por meio de algumas propriedades mecânicas e verificou que essa forma de avaliação não guarda muita relação com o que acontece em campo, podendo fornecer conclusões equivocadas. A avaliação de dano por umidade induzida pode ser utilizada para prever o desempenho de misturas asfálticas em campo, com relação à adesividade entre o ligante e os agregados. O dano por umidade caracteriza um processo acelerado pela presença de água, que pode levar à ruptura por outros defeitos como afundamento em trilhas de rodas, trincas por fadiga ou desagregação com evolução para buracos e panelas. Na Figura 2.19 mostra-se os e equipamentos e passos para o condicionamento e determinação da resistência a tração segundo critérios do ensaio de *Lottman* Modificado.

Figura 2-19 : Passos para o condicionamento e para a determinação da RT.



2.6 DEFEITOS DE SUPERFÍCIE NOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Os defeitos de superfície são os danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser identificados a olho nu e classificados segundo uma terminologia normatizada, conforme DNIT TER 005/2003 (DNIT, 2003a). O levantamento dos defeitos de superfície tem por finalidade avaliar o estado de conservação dos pavimentos asfálticos e embasa o diagnóstico da situação funcional para subsidiar a definição de uma solução tecnicamente adequada e, em caso de necessidade, indicar a melhor ou melhores alternativas de restauração do pavimento. Na gerência de pavimentos ou de manutenção, o conjunto de defeitos de um dado trecho pode ser resumido por índices que auxiliem na hierarquização de necessidades e alternativas de intervenção (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Os defeitos de superfície podem aparecer precocemente (devido a erros ou inadequações) ou a médio ou longo prazo (devido à utilização pelo tráfego e efeitos das intempéries). Os defeitos de pavimentos asfálticos decorrem de erros de projeto, erros ou inadequações na seleção, na dosagem ou na produção de materiais, erros ou inadequações construtivas, erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção.

Antes da adoção de qualquer alternativa de restauração ou aplicação de qualquer critério numérico ou normativo para cálculo de reforços, um bom diagnóstico geral dos defeitos de superfície é imprescindível para o estabelecimento da melhor solução. Portanto, para corrigir ou minimizar uma consequência (defeito), deve-se conhecer as prováveis causas que levaram ao seu aparecimento. Para tanto, recomenda-se: verificação *in situ* dos problemas de superfície, relações com as condições geométricas, dos taludes e de drenagem; levantamento de dados climáticos, de tráfego, de mapas geológicos, pedológicos ou geotécnicos; levantamento de memórias técnicas e de relatórios de projeto e de controle; e estabelecimento de um cenário global dos defeitos e sua relação com todos os dados observados e levantados.

Os métodos de levantamentos sistemáticos de defeitos de superfície em pavimentos asfálticos são:

- norma DNIT TER 005/2003 (DNIT, 2003a) - Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos: terminologia.
- norma DNIT PRO 006/2003 (DNIT, 2003b) - Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

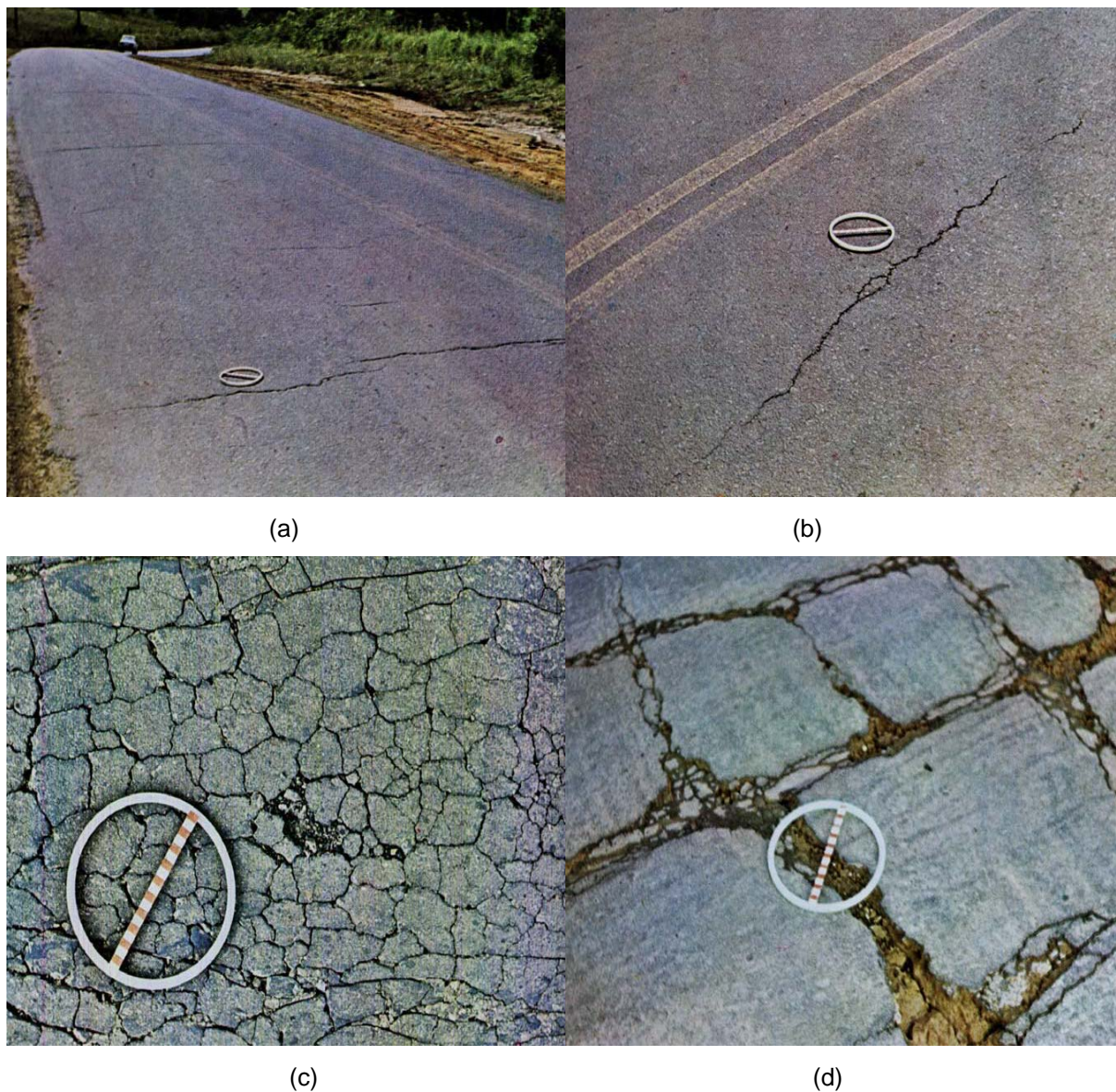
Os tipos de defeitos catalogados pela norma brasileira e que são considerados para cálculo de indicador de qualidade da superfície do pavimento (IGG – Índice de Gravidade Global) são: fendas (F); afundamentos (A); corrugação e ondulações transversais (O); exsudação (EX); desgaste ou desagregação (D); panela ou buraco (P); e remendos (R).

A fenda é definida como qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que conduza a aberturas de menor ou maior porte, apresentando-se sob formas de fissuras e trincas. As fendas de largura capilar existente no revestimento, posicionada longitudinal, transversal ou obliquamente ao eixo da via, somente perceptível a vista desarmada de uma distância inferior a 1,50 m são chamadas de fissuras. As fissuras são fendas incipientes que ainda não causam problemas funcionais ao revestimento, não sendo assim consideradas quanto à gravidade nos métodos atuais de avaliação das condições de superfície. As fendas representam um dos defeitos mais significativos dos pavimentos asfálticos e são subdivididas dependendo da tipologia e da gravidade. A gravidade das fendas é caracterizada por classe 1 (fendas com abertura não superior a 1mm), classe 2 (fendas com abertura superior a 1mm), e classe 3 (fendas com abertura superior a 1mm e desagregação ou erosão junto às bordas).

Quanto à tipologia, as trincas isoladas podem ser: transversais curtas (TTC) ou transversais longas (TTL), longitudinais curtas (TLC) ou longitudinais longas (TLL), ou ainda de retração (TRR). As trincas interligadas são subdivididas em: trincas de bloco (TB) quando tendem a uma regularidade geométrica, ou ainda (TBE) quando as trincas de bloco apresentam complementarmente erosão junto às suas bordas; ou trincas tipo couro de jacaré (J) quando não seguem um padrão de reflexão geométrico de trincas como as de bloco e são comumente derivadas da fadiga do revestimento asfáltico, ou ainda (JE) quando as trincas tipo couro de jacaré apresentam complementarmente erosão junto às suas bordas. A Figura 2.20 mostra a trinca

isolada transversal, a trinca isolada longitudinal, a trinca interligada longitudinal tipo jacaré e a trinca interligada tipo bloco.

Figura 2-20 : (a) trinca isolada transversal, (b) trinca isolada – longitudinal, (c) trinca interligada – tipo jacaré e (d) trinca interligada – tipo bloco

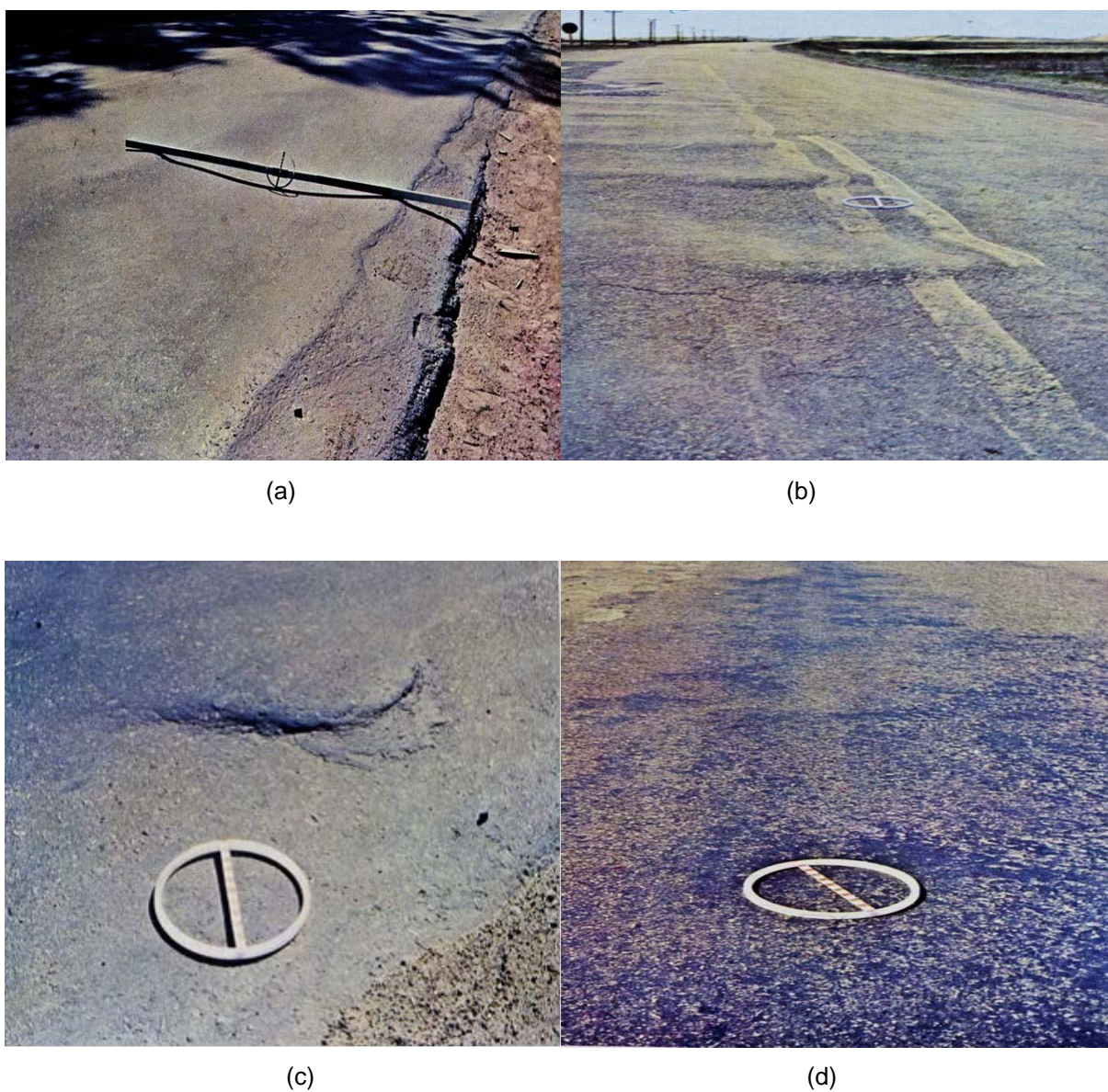


Fonte: DNIT TER 005/2003 (DNIT, 2003a).

Outro defeito importante são os afundamentos que são deformações permanentes caracterizadas por depressão da superfície do pavimento, acompanhada, ou não, de solevamento, podendo apresentar-se sob a forma de afundamento plástico ou de consolidação de suas camadas subjacentes, incluindo o subleito. Os afundamentos são classificados como: afundamento por consolidação (AC), quando as depressões ocorrem por densificação diferencial, podendo ser localizado (ALC) quando a

extensão não supera 6m, ou longitudinal nas trilhas de roda (ATC) no caso que exceda 6m de extensão; ou afundamentos plásticos (AP), quando as depressões são decorrentes principalmente da fluência do revestimento asfáltico, podendo ser localizado (ALP) ou longitudinal nas trilhas de roda (ATP). Em geral, neste último tipo de afundamento, há certa compensação volumétrica, com sollevamento da massa asfáltica junto às bordas do afundamento. A Figura 2.21 mostra o afundamento de trilha de roda, ondulação, escorregamento e exsudação.

Figura 2-21 : (a) afundamento de trilha de roda, (b) ondulação, (c) escorregamento e (d) exsudação.



Fonte: DNIT TER 005/2003 (DNIT, 2003a).

As ondulações ou corrugações (O) são deformações transversais ao eixo da pista, em geral compensatórias, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de alguns centímetros ou dezenas de centímetros. As ondulações (O) são também deformações transversais ao eixo da pista, em geral decorrentes da consolidação diferencial do subleito, diferenciadas da corrugação pelo comprimento de onda entre duas cristas da ordem de metros. Ambas são classificadas pela letra (O) na norma brasileira, embora sejam decorrentes de fenômenos diferentes.

O escorregamento (E) é o deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua. A exsudação (EX) é excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante por meio do revestimento, caracterizada pelo surgimento de ligante em abundância na superfície, como manchas escurecidas, decorrente em geral do excesso do mesmo na massa asfáltica.

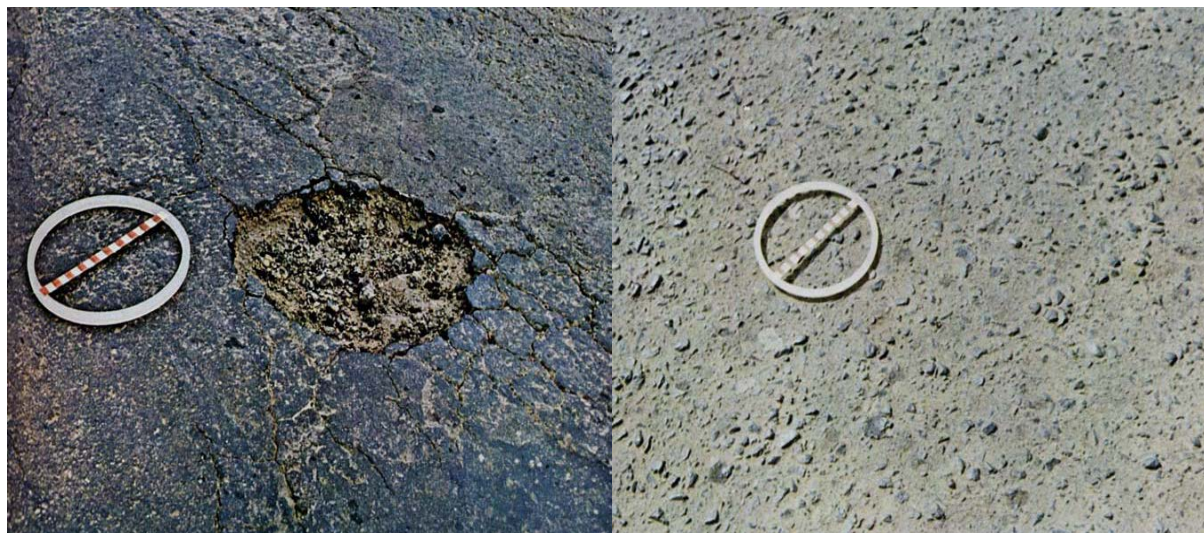
O desgaste (D) ou ainda desagregação é o efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego. Decorre do desprendimento de agregados da superfície ou ainda da perda de masticue junto aos agregados. A panela (P) ou buraco é uma cavidade que se forma no revestimento asfáltico, podendo alcançar as camadas inferiores, provocando desagregação. Na Figura 2.22 mostra-se a panela ou buraco e o desgaste na camada de rolamento.

O remendo (R) é um tipo de defeito apesar de estar relacionado a uma conservação da superfície e caracteriza-se pelo preenchimento de painéis ou de qualquer outro orifício ou depressão com massa asfáltica na operação denominada de “tapa-buraco”.

Outros defeitos, apesar de não acarretarem prejuízo nos indicadores do tipo IGG, são também importantes e devem ser considerados para uma análise da solução de restauração: escorregamento do revestimento asfáltico, polimento de agregados, bombeamento de finos, trincas distintas das anteriores como trincas de borda próximas aos acostamentos e parabólicas, falhas do bico espargidor, desnível entre pista e acostamento, marcas impressas na superfície – marcas de pneus,

empolamento ou elevações por expansão ou raízes de árvores, entre outros (Bernucci *et al.*, 2006).

Figura 2-22 : (a) panela/buraco, (b) desgaste.



(a)

(b)

Fonte: DNIT TER 005/2003 (DNIT, 2003a).

Capítulo 3

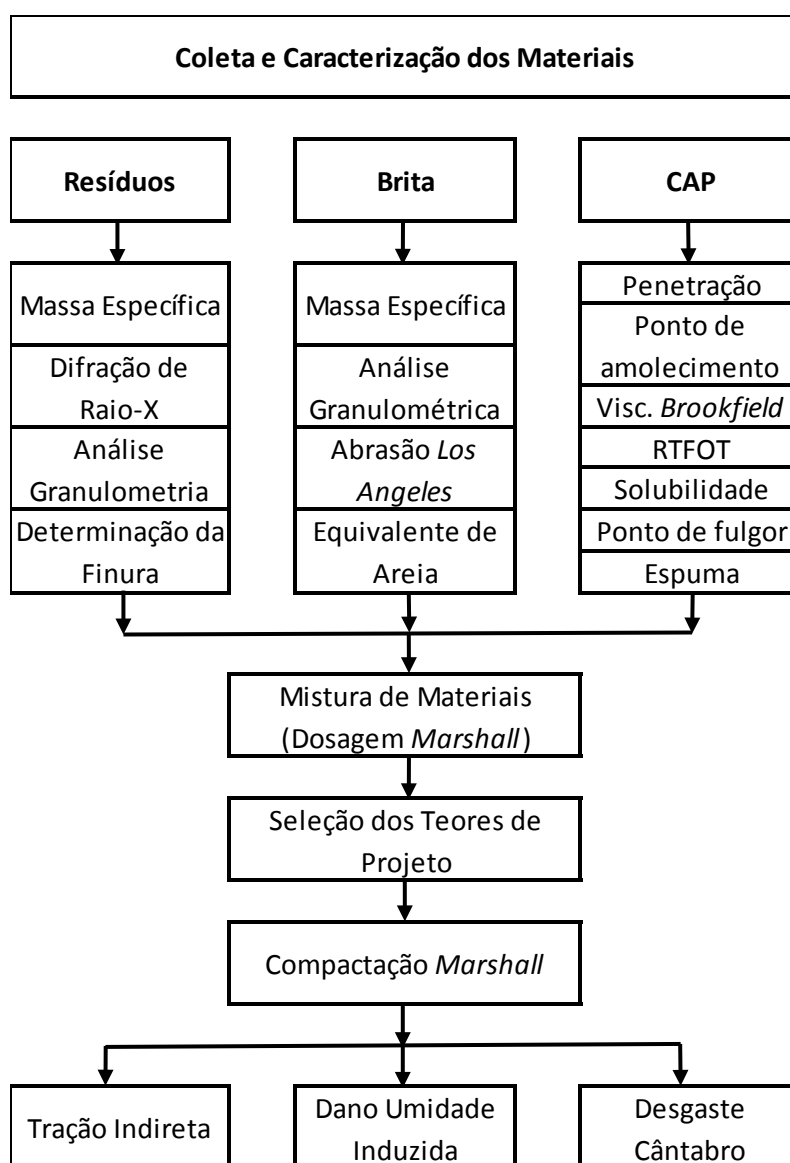
Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.

Isaac Newton

3 MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS

No capítulo anterior foi apresentada a fundamentação teórica onde foram abordados os resíduos sólidos, o beneficiamento dos resíduos de rochas ornamentais e de escória de aciaria, o fíler nas misturas asfálticas, misturas asfálticas com adição de resíduos, métodos de dosagem do concreto asfáltico, as características mecânicas, das propriedades de adesividade das misturas asfálticas e os defeitos de superfície nos pavimentos asfálticos.

Figura 3-1 : Sequência de atividades e de ensaios realizados na fase experimental da pesquisa



Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia empregada na fase experimental, visando a caracterização física e mineralógica dos

agregados e caracterização mecânica das misturas asfálticas. Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), da *American Society for Testing and Materials (ASTM)* e da *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*. Na Figura 3.1 apresenta-se um fluxograma com os ensaios realizados.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO)

O Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma empresa de desdobramento de blocos de rocha, Granriva Granitos, localizada na cidade de Colatina/ES.

O processo de geração de resíduos consiste no seguinte: os resíduos eliminados no processo de corte dos blocos são encaminhados por meio de canaletas ou tubulações aos silos de armazenagem e decantação; em seguida são levados ao filtro prensa, para diminuir seu teor de umidade. Parte da água retirada do resíduo é tratada e reaproveitada no processo retornando por bombeamento, ficando o resíduo com umidade reduzida, em torno de 20%, estocado nos pátios das empresas.

Para a presente pesquisa, o material foi coletado e encaminhado ao Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Em laboratório, o resíduo foi submetido à secagem em estufa (105 °C) e posteriormente destorroado com auxílio do almofariz e da mão-de-grau. Após esse processo o resíduo passou pela peneira de malha quadrada com abertura de 0,075 mm, atendendo plenamente à especificação em vigor no DNIT para materiais de enchimento ou fíler, conforme do DNER-EM 367/97 (DNER, 1997). A amostra foi homogeneizada, quarteada e estocada em sacos plásticos. Na Figura 3.1 apresenta-se uma parte da amostra do Resíduo de Beneficiamento de Rochas Ornamentais.

Figura 3-2 : Amostra do Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais.



3.1.2 Escória Moída de Aciaria (EMA)

A escória de aciaria utilizada foi Escória de Aciaria com Redução de Expansão - ACERITA®, fornecida pela ArcelorMittal. A empresa está localizada em Jardim Limoeiro, Serra, próximo ao Porto de Praia Mole, na região da Grande Vitória/ES.

ACERITA® é um coproduto siderúrgico que depois de britado e separado em faixas granulométricas adequadas, é submetido a um tratamento para redução de expansão. Esse processo consiste em "estimular" a reação dos óxidos livres a partir de reação dos mesmos com o ar e a água, por meio de um processo de umectação e aeração da escória durante certo período de tempo. Durante o período de tratamento para a redução da sua capacidade de expansão, a escória de aciaria é permanentemente monitorada por meio de ensaios de laboratório e testes previstos pelas normas do DNIT para utilização em base e sub-base dos pavimentos rodoviários. Ao atingir um valor de expansão que atenda as normas técnicas, o processo é interrompido e o material é disponibilizado para o mercado com o nome de ACERITA® - Escória de Aciaria com Redução de Expansão.

As amostras de ACERITA® foram coletadas e enviadas ao LEMAC-UFES, onde foram submetidas a secagem em estufa (105°C), moídas por meio do moinho de argolas, com o objetivo de reduzir o diâmetro de suas partículas, peneirado em peneira de malha quadrada de abertura 0,075mm, homogeneizada, quarteada e estocada em

sacos plásticos. A textura final do resíduo pronto para aplicação na mistura pode ser visualizada na Figura 3.3.

Figura 3-3 : Amostra de Escória Moída de Aciaria.



3.1.3 Cal

A Cal Hidratada da marca Massical, foi obtida no comércio local de Vila Velha/ES. Amostras foram enviadas ao LEMAC-UFES, onde foram submetidas a secagem em estufa (105°C) e estocada em sacos plásticos. A textura final da Cal para aplicação na mistura pode ser visualizada na Figura 3.3.

Figura 3-4 : Amostra de Cal.



3.1.4 Agregados Minerais Naturais

Os agregados minerais naturais utilizados nesta pesquisa foram coletados na Pedreira Rydien Mineração Indústria e Comércio Ltda, localizada em Jardim Asteca, no município de Vila Velha/ES. O tipo de rocha original é o Granito sendo sua resultante o Gnaiss. As amostras de Brita 1, Brita 0, Granilha e Pó de pedra são os mesmos materiais utilizados na produção de CA para pavimentação e manutenção da malha viária municipal e em algumas rodovias estaduais do estado do Espírito Santo. Os agregados foram coletados segundo a norma DNER-PRO 120/97 (DNER, 1997) e amostras foram reduzidas em porções menores, segundo a norma DNER-PRO 199/96 (DNER, 1996), para a realização dos ensaios de caracterização e posterior moldagem dos corpos-de-prova de CA utilizados na dosagem e caracterização mecânica das misturas. A textura final da Brita1, Brita 0, da Granilha e do Pó de Pedra para aplicação na mistura podem ser visualizados nas Figuras 3.5 e 3.6.

Figura 3-5 : Amostras de Brita 1 (a) e Brita 0 (b).

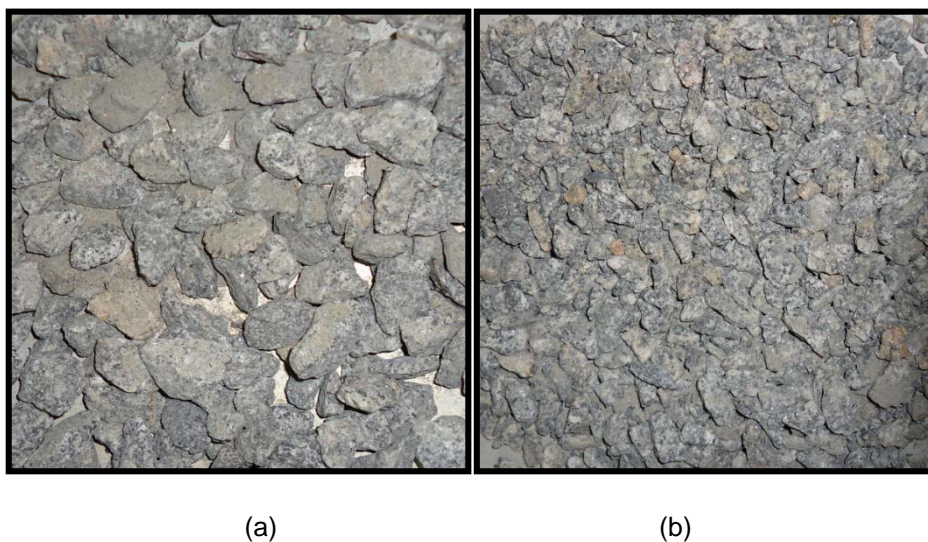


Figura 3-6 : Amostra de Granilha (a) e Pó de Pedra (b).



(a)

(b)

3.1.5 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) utilizado na pesquisa é classificado como CAP 50-70, produzido pela Refinaria Gabriel Passos (REGAP), a qual está localizada em Betim, na região metropolitana de Belo Horizonte, em Minas Gerais, pertencente ao parque de refinarias da empresa Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras). Na Figura 3.7 mostra-se a amostra de CAP 50/70 e sua forma de acondicionamento para o transporte da refinaria até o laboratório onde foram moldados os corpos-de-prova (Laboratório Alcino Vieira Brasil), em Vila Velha. O relatório com dados de caracterização física e reológica do ligante foi realizado por técnicos da REGAP e os seus resultados foram utilizados neste trabalho.

Figura 3-7 : Amostra de CAP 50/70 e forma de armazenamento para transporte.



3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização física dos Agregados Graúdo e Miúdo

3.2.1.1 Agregados Graúdos – Brita 1, Brita 0 e Granilha

Na Tabela 3.1 têm-se a lista de ensaios que foram realizados para caracterização dos agregados graúdos.

Tabela 3-1 : Ensaios e normas utilizados na caracterização do agregado graúdo.

| ENSAIO | NORMA |
|--|------------------------------|
| Análise Granulométrica | DNER ME 083/98 (DNER, 1998c) |
| Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo | DNER ME 081/98 (DNER, 1998b) |
| Determinação da Abrasão a <i>Los Angeles</i> | DNER ME 035/98 (DNER, 1998a) |

3.2.1.2 Agregado Miúdo – Pó de Pedra

Na Tabela 3.2 a seguir têm-se a lista de ensaios que foram realizados para caracterização dos agregados miúdos.

Tabela 3-2 : Ensaios e normas utilizados na caracterização do agregado miúdo.

| ENSAIO | NORMA |
|--|------------------------------|
| Análise Granulométrica | DNER ME 083/98 (DNER, 1998c) |
| Determinação da densidade real do agregado miúdo | DNER ME 084/95 (DNER, 1995b) |
| Equivalente de Areia | DNER ME 054/97 (DNER, 1997a) |

Os agregados graúdos e miúdos foram utilizados na composição da mistura asfáltica em proporções ajustadas por tentativas de acordo com um projeto de misturas asfálticas já em uso comercial.

3.2.2 Caracterização dos Fíleres – Cal, RBRO e EMA

Na Tabela 3.3 a seguir têm-se a lista de ensaios que foram realizados para caracterização dos fíleres da mistura.

Tabela 3-3 : Ensaio e normas utilizados na caracterização dos fíleres.

| ENSAIO | NORMA |
|--|------------------------------|
| Análise granulométrica do fíler por sedimentação | ABNT NBR 7181 (ABNT, 1994) |
| Determinação da Massa Específica | ABNT NM 23 (ABNT, 2001) |
| Difração de Raio X | DNER ME 054/97 (ABNT, 1997a) |
| Determinação da Finura pelo Método da Permeabilidade ao Ar | ABNT NM 76 (ABNT, 1998) |

Após a caracterização dos fíleres, estes foram utilizados na composição da mistura asfáltica em proporções de 2%, 3% e 4%, em substituição de parte do material passante na peneira nº 200, de acordo com o traço já em uso comercial.

3.2.3 Dosagem *Marshall*

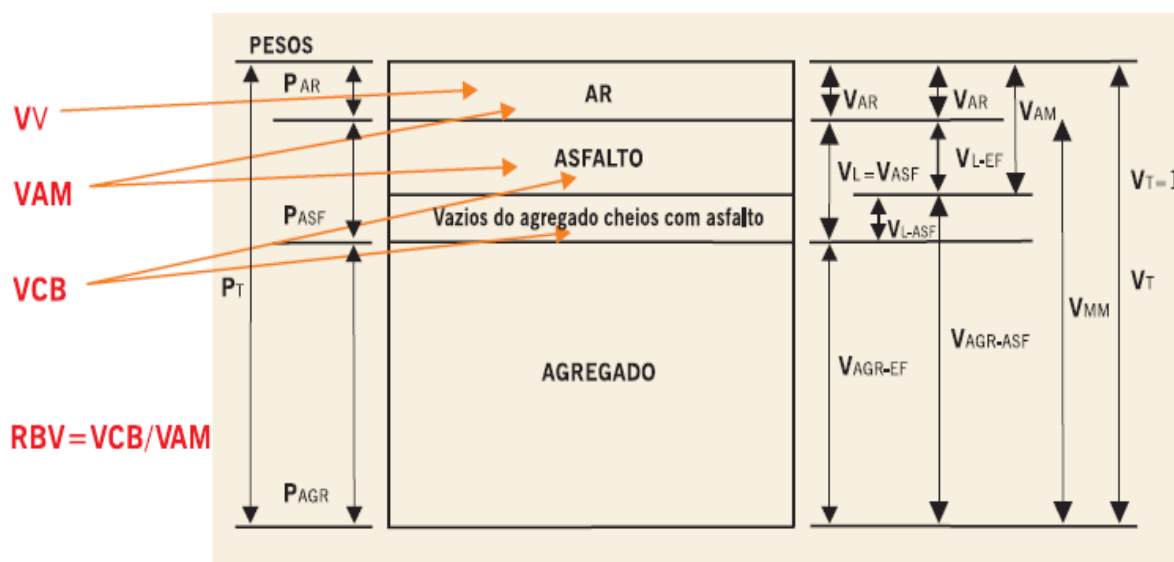
Para atingir o objetivo inicial desta pesquisa foi necessário identificar o teor ótimo de CAP para a mistura de referência e para as misturas com adição de Cal, RBRO e EMA, contemplando as variações de 0%, 2%, 3% e 4%, conforme planejamento experimental. Assim, foram estudadas um total de 11 misturas de acordo com a Tabela 3.4, onde são relacionadas o porcentagem de substituição de parte do material passante na peneira nº 200 nas misturas asfálticas pelos fíleres de Cal, RBRO e EMA.

Tabela 3-4 : Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura.

| Mistura | Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura (%) |
|------------|--|
| Referência | 0% |
| Cal | 2% |
| | 2% |
| RBRO | 3% |
| | 4% |
| | 2% |
| EMA | 3% |
| | 4% |
| 50% RBRO | 2% |
| + 50% | 3% |
| EMA | 4% |

No procedimento de dosagem de misturas asfálticas foram determinados os parâmetros volumétricos utilizados na dosagem *Marshall*, a saber: Densidade Máxima Teórica (DMT), Densidade Aparente da Mistura (G_{mb}), Volume de Vazios (V_v), Vazios Cheios com Betume (VCB), Vazios do Agregado Mineral (VAM), e Relação Betume/Vazios (RBV). Parâmetros importantes, os Volume de Vazios (V_v) e o Volume do Agregados Mineral (VAM), representam o que não é agregado numa mistura, ou seja, vazios com ar e asfalto. A Figura 3.8 ilustra esses volumes e ainda os Vazios Cheios com Betume (VCB), que diz respeito tanto ao asfalto disponível para a mistura como àquele absorvido, e a relação betume-vazios, dada pela razão VCB/VAM .

Figura 3-6 : Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006

As misturas foram dosadas pela metodologia *Marshall* segundo a norma DNER – ME 43/95 (DNER, 1995). A seguir têm-se o detalhamento das dosagens:

- De posse da granulometria dos agregados minerais e dos fíleres, realizou-se com auxílio de planilha Excel, a composição das misturas, isto é, para cada teor de fíler foram obtidas percentagens de agregados diferentes, não se considerando, neste momento, o teor de asfalto. As misturas foram dosadas com a finalidade de que suas granulometrias se enquadrassem na faixa “C” do DNIT da Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a), que a faixa mais utilizada em pavimentação na região, conforme Tabela 3.5.

- b) Para determinação do teor de CAP de cada mistura, foram moldados três conjuntos de corpos de prova por teor de CAP, com incremento de 0,5% de CAP para cada conjunto de CPs, contendo percentagem de fíler conforme a Tabela 3.5, onde foram executadas com cinco teores de CAP diferentes, ou seja, cinco pontos para cálculo das propriedades volumétricas das misturas.

Tabela 3-5 : Faixas Granulométricas do concreto asfáltico do DNIT ES - 031/2006 (DNIT, 2006).

| PENEIRA DE MALHA QUADRADA | | % EM MASSA PASSANDO | | | |
|--|---------------|---|--|----------------------------------|-------------|
| Série ASTM | Abertura (mm) | Faixa A | Faixa B | Faixa C | Tolerâncias |
| 2" | 50,8 | 100 | - | - | - |
| 1 ½ " | 38,1 | 95-100 | 100 | - | ± 7% |
| 1" | 25,4 | 75-100 | 95-100 | - | ± 7% |
| ¾" | 19,1 | 60-90 | 80-100 | 100 | ± 7% |
| ½" | 12,7 | - | - | 80-100 | ± 7% |
| 3/8" | 9,5 | 35-65 | 45-80 | 70-90 | ± 7% |
| Nº 4 | 4,8 | 25-50 | 28-60 | 44-72 | ± 5% |
| Nº 10 | 2 | 20-40 | 20-45 | 22-50 | ± 5% |
| Nº 40 | 0,42 | 10-30 | 10-32 | 8-26 | ± 5% |
| Nº 80 | 0,18 | 5-20 | 8-20 | 4-16 | ± 3% |
| Nº 200 | 0,075 | 1-8 | 3-8 | 2-10 | ± 2% |
| Asfalto Solúvel no CS ₂ (+) (%) | | 4,0 - 7,0 Camada de Ligação (Binder) | 4,5 - 7,5 Camada de Ligação e Rolamento | 4,5 - 9,0 Camada de Rolamento | ± 0,3% |

Fonte: DNIT-ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

- c) A densidade máxima teórica (DMT) foi determinada por meio da Equação 3.1, por meio da ponderação das densidades reais dos materiais que compõem as misturas asfálticas.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga} + \frac{\%Brita1}{GBrita1} + \frac{\%Brita0}{GBrita0} + \frac{\%Granilha}{GGranilha} + \frac{\%PóPedra}{GPóPedra} + \frac{\%Fíler}{GFíler}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

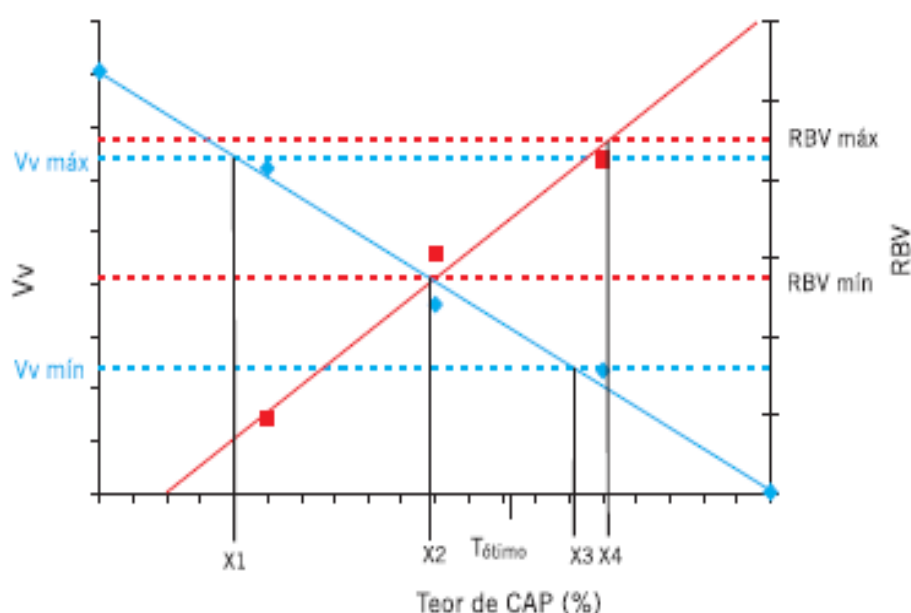
Onde:

$\%a$, $\%Brita1$, $\%Brita0$, $\%Granilha$, $\%PóPedra$ e $\% Fíleres$ são as porcentagens de asfalto, brita 1, brita 0, granilha, pó de pedra e fíler, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

Ga , $GBrita1$, $GBrita0$, $Ggranilha$, $GPóPedra$ e $Fíler$ são as massas específicas reais de asfalto, brita 1, brita 0, granilha, pó de pedra e fíler, respectivamente.

- d) A escolha do teor ótimo de CAP para cada mistura foi realizada segundo os critérios de dois parâmetros volumétricos, o volume de vazios (V_v) e relação betume vazios (RBV). O Teor ótimo de CAP foi obtido traçando-se um gráfico com os cinco valores médios de V_v e RBV dos teores de CAP dosados (no eixo X) versus V_v (no eixo y1) e RBV (no eixo y2). O gráfico traçado continha os valores máximos e mínimos para o V_v e o RBV preconizados pela Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a), conforme Tabela 3.5. Os teores de asfaltos para as respectivas percentagens de de fíleres, foram obtidos a partir da interseção da linha de tendência do V_v e do RBV com os respectivos limites mínimos e máximos desses parâmetros, de onde se obtém como resultado quatro teores de CAP, e o valor de CAP selecionado é a média dos valores centrais conforme Figura 3.9.

Figura 3-7 : Exemplo de gráfico utilizado para determinação do teor ótimo de CAP.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2006

Tabela 3-6 : Parâmetros de dosagem de concreto asfáltico do DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

| CARACTERÍSTICAS | MÉTODO DE ENSAIO | CAMADA DE ROLAMENTO | CAMADA DE LIGAÇÃO |
|------------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------|
| Vv, % | DNER-ME 043/95 (DNER, 1995a) | 3 - 5 | 4 - 6 |
| RBV, % | DNER-ME 043/95 (DNER, 1995a) | 75 - 82 | 65 - 72 |
| Estabilidade mín., Kgf (75 golpes) | DNER-ME 043/95 (DNER, 1995a) | 500 | 500 |
| RT a 25°C, mín., MPa | DNER-ME 138/94 (DNER, 1994e) | 0,65 | 0,65 |

Fonte: DNIT-ES 031/2006 (DNIT, 2006a)

A Tabela 3.7 apresenta os quantitativos de corpos de prova utilizados para a determinação dos teores ótimos de CAP, em função da percentagem de fíleres adicionados na mistura.

Tabela 3-7 : Quantitativos dos Corpos de prova para determinação dos teores ótimos de CAP.

| Mistura | Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura (%) | Teor de Asfalto | | | | | | |
|-------------------------------|--|-----------------|------|------|------|------|------|--------------|
| | | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 | 6,5 | Total |
| Referência | 0% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| Cal | 2% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| RBRO | 2% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| | 3% | - | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 15CPs |
| | 4% | - | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 15CPs |
| EMA | 2% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| | 3% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| | 4% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| 50% RBRO + 50% EMA | 2% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| | 3% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| | 4% | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | 3CPs | - | 15CPs |
| 165CPs | | | | | | | | |

3.2.4 Caracterização mecânica das misturas asfálticas e avaliação das propriedades de adesividade

Após a determinação dos teores ótimos de CAP para as misturas asfálticas com as porcentagens de 0%, 2%, 3% e 4% de fíleres de Cal, RBRO, EMA e RBRO/EMA, com agregados naturais realizaram-se novos ensaios para caracterização mecânica das misturas asfálticas que são os ensaios de Estabilidade *Marshall*, Resistência à Tração

(RT), e os ensaios para avaliação das propriedades de adesividade, que foram os Ensaio de *Lottman* Modificado e Desgaste Cântabro.

Para realização dos ensaios de Resistência à Tração (RT), Ensaio de *Lottman* Modificado e Desgaste Cântabro, os corpos de prova foram compactados pela metodologia *Marshall*, que é a mais usada no Brasil sendo a sua compactação feita por impacto (golpes).

A Tabela 3.8 apresenta os quantitativos dos corpos de prova moldados do programa experimental para caracterização mecânica das misturas asfálticas com adição de resíduos.

Tabela 3-8 : Quantitativos dos corpos de prova para caracterização mecânica das misturas asfálticas.

| Mistura | Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura (%) | Estabilidade <i>Marshall</i> | Resistência à Tração (RT) | <i>Lottman</i> Modificado | Desgaste Cântabro | Total |
|--------------------|---|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|---------------|
| Referência | 0% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| Cal | 2% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| RBRO | 2% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| | 3% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| | 4% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| EMA | 2% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| | 3% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| | 4% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| 50% RBRO + 50% EMA | 2% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| | 3% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| | 4% | 3CPs | 3CPs | 6CPs | 3CPs | 15CPs |
| | | | | | | 165CPs |

3.2.4.1 Estabilidade *Marshall*

A estabilidade *Marshall* foi determinada de acordo com o método de ensaio DNER ME 043/95 (DNER, 1995a). Foram moldados três corpos de prova para cada teor ótimo de CAP obtido de acordo com a Tabela 3.7. Os corpos de prova foram moldados de forma manual. Neste ensaio, além da estabilidade *Marshall* foram determinadas as propriedades volumétricas, que foram comparadas aos valores obtidos por meio dos cálculos para determinação dos teores ótimos. Na figura 3.8 mostra-se a prensa para o ensaio *Marshall* bem como a execução da mistura.

Figura 3-8 : Ensaio para Determinação da Estabilidade e Fluência *Marshall* (a) prensa *Marshall* e (b) execução da Mistura.



(a) Prensa *Marshall*

(b) Execução da Mistura

3.2.4.2 Ensaio de Tração por Compressão Diametral

O ensaio de Tração por Compressão Diametral foi realizado de acordo com o método de Ensaio DNER ME 138/94 (DNER, 1994e), e a moldagem dos corpos de prova realizada pela metodologia *Marshall*. Para realização destes ensaios foram moldados três corpos de prova para cada teor ótimo de CAP em função da porcentagem de fíleres, obtidos nos ensaios de Dosagem *Marshall*. O ensaio de Resistência a Tração (RT) tem como objetivo a determinação do melhor desempenho do pavimento quanto ao desgaste superficial da mistura (Figura 3.9).

Figura 3-9 : Ensaio de Resistência à Tração (RT) (a) pórtico (b) ruptura do corpo de prova.



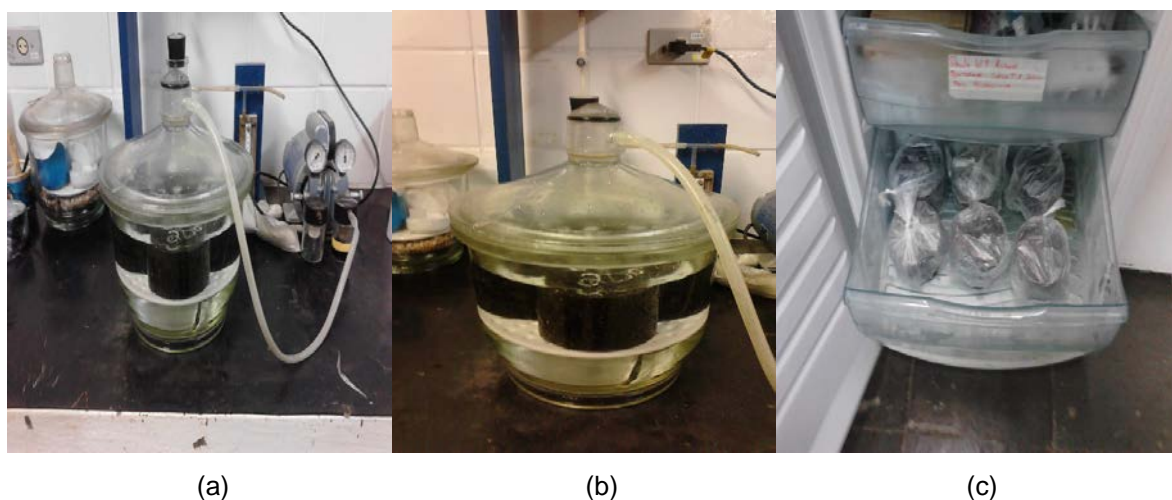
(a)

(b)

3.2.4.3 Ensaio de *Lottman* modificado

O ensaio de perda de resistência por umidade induzida foi realizado de acordo com o método de ensaio DNER ME 138/94 (DNER, 1994e) e AASHTO T 283/89 da *American Association of State Highway Officials* (AASHTO, 1989). Foram moldados seis corpos de prova pela metodologia *Marshall* para cada teor ótimo de CAP em função da porcentagem de fíleres para as misturas asfálticas, obtidos por meio dos ensaios de Dosagem *Marshall*. Inicialmente os corpos de prova foram submetidos ao condicionamento, e em seguida realizado o ensaio de Resistência à Tração, a fim de comparar os valores de Resistência à Tração dos corpos de prova condicionados com os valores de Resistência à Tração dos corpos não condicionados. A Figura 3.10 mostra algumas imagens deste ensaio.

Figura 3-10 : Ensaio de *Lottman* modificado (a) bomba a vácuo (b) saturação dos corpos de prova (c) congelamento.



Segundo Furlan (2004) o principal ensaio utilizado na avaliação dos danos por umidade das misturas asfálticas é o de resistência à tração por compressão diametral, e sua aplicação é justificada pelo fato de refletir o esforço ao qual a película de asfalto é submetida quando descolada/arrancada e, além disso, o ensaio também apresenta sensibilidade suficiente para diagnosticar variações na resistência ou perdas de coesão da mistura. O critério de aceitação AASHTO T 283/89 (AASHTO, 1989), é baseado numa determinada taxa de propriedade retida, que é definida pela relação

entre a resistência à tração média condicionada e a não condicionada. A resistência à tração retida (RRT) deve ser, no mínimo, de 80% para a aceitação da mistura.

Para a saturação parcial do corpo-de-prova compactado é utilizada uma bomba de vácuo numa determinada pressão entre 250 e 650 mmHg, que proporciona a entrada da água no mesmo. Atingida a saturação desejada (entre 55% e 80%), procede-se o condicionamento térmico, que é composto por um ciclo de congelamento (-18°C por 16 horas) e um de descongelamento (imersão em água a 60°C por 24 horas). Para *Lottman*, a presença de água congelada nos poros da mistura asfáltica simula as tensões de tração no CA, devido à expansão causada pela formação de cristais de gelo. Como consequência desta expansão pode haver ruptura de ligações adesivas mais frágeis, ou ainda, de agregados porosos ou fissurados (desde que descobertos da película de ligante), comprometendo a durabilidade da mistura.

3.2.4.4 Ensaio de Desgaste por Abrasão Cântabro

O procedimento utilizado para avaliação do desgaste por abrasão foi o indicado no método de ensaio DNER – ME 383/99 (DNER, 1999), que, apesar de ter sua aplicação voltada para misturas porosas, ou abertas, pode apresentar resultados relevantes quanto à avaliação da variação da quantidade de fíleres na mistura.

Nesta pesquisa foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, de acordo com a metodologia *Marshall*, nos teores de projeto definidos pela dosagem *Marshall* das misturas estudadas. Após pesagem e condicionamento mínimo de 4 horas à temperatura de 25 °C, os corpos de prova foram submetidos, individualmente, a 300 revoluções no equipamento de abrasão *Los Angeles*, a 33 rpm, sem as esferas metálicas. Ao final da aplicação das rotações, as amostras foram pesadas novamente. A Figura 3.11 mostra algumas imagens deste ensaio.

Figura 3-11 : Ensaio de Desgaste Cântabro (a) Tambor de desgaste (b) visualização dos corpos de Prova antes e depois (c) corpos de prova após ensaios.



(a)

(b)

(c)

Capítulo 4

Mede o que é mensurável e torna mensurável o que não o é.

Galileu Galilei

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo anterior foram apresentados os materiais utilizados na pesquisa e a metodologia empregada na fase experimental para caracterização física e mineralógica dos agregados e caracterização mecânica das misturas asfálticas.

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. São apresentados os resultados da caracterização física e mineralógica dos materiais que compõem as misturas asfálticas de referência e as com a adição dos fíleres da Cal e dos resíduos de RBRO, EMA e da mistura de RBRO/EMA. Também são apresentados os resultados da caracterização mecânica das misturas asfálticas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA DOS AGREGADOS

4.1.1 Agregados Naturais – Brita 1, Brita 0, Granilha e Pó de pedra

4.1.1.1 Análise Granulométrica

A Figura 4.1 e a Tabela 4.1 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais granulares utilizados na pesquisa.

Figura 4-1 : Curva granulométrica dos agregados naturais.

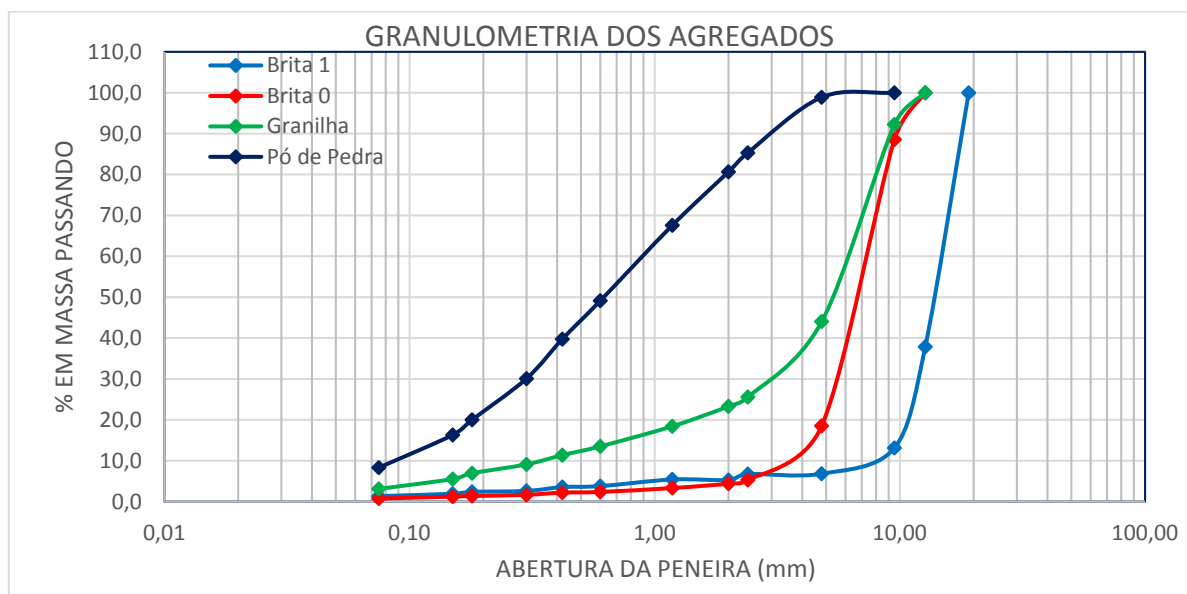


Tabela 4-1 : Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados.

| Abertura da Peneira de Malha Quadrada | | Material Passando (%) | | | |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|---------|----------|-------------|
| mm | Pol / n° | Brita 1 | Brita 0 | Granilha | Pó de Pedra |
| 19,10 | 3/4" | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 12,70 | 1/2" | 37,88 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 9,50 | 3/8" | 13,12 | 88,55 | 92,24 | 100,00 |
| 4,80 | 4 | 6,84 | 18,54 | 44,03 | 98,90 |
| 2,40 | 8 | 6,76 | 5,30 | 25,56 | 85,32 |
| 2,00 | 10 | 5,31 | 4,41 | 23,29 | 80,66 |
| 1,18 | 16 | 5,43 | 3,34 | 18,43 | 67,58 |
| 0,60 | 30 | 3,81 | 2,38 | 13,51 | 49,12 |
| 0,42 | 40 | 3,57 | 2,22 | 11,37 | 39,74 |
| 0,30 | 50 | 2,63 | 1,68 | 9,11 | 30,09 |
| 0,18 | 80 | 2,41 | 1,39 | 6,94 | 20,00 |
| 0,15 | 100 | 1,95 | 1,24 | 5,52 | 16,30 |
| 0,075 | 200 | 1,36 | 0,77 | 3,10 | 8,30 |

As distribuições granulométricas dos agregados naturais, foram obtidas de acordo com a norma DNER – ME 083/98 (DNER, 1998c). A dimensão máxima característica da brita 1 é de 19,1 mm, da brita 0 de 12,7 mm, da granilha é de 12,7 mm e do pó de pedra é 4,8 mm. O módulo de finura da brita 1 é 6,59, da brita 0 é 5,79, da granilha é 4,92 e do pó de pedra é 2,56. O teor de material pulverulento da brita 1 e da brita 0 é 1%, da granilha é 3% e do pó de pedra é de 8%.

4.1.1.2 Massas Específicas

Na Tabela 4.2 estão inseridas as massas específicas reais dos agregados utilizados na pesquisa.

Tabela 4-2 : Massa específica real dos agregados naturais utilizados na pesquisa.

| Agregado | Massa Específica Real (g/cm³) |
|-------------|-------------------------------|
| Brita 1 | 2,793 |
| Brita 0 | 2,791 |
| Granilha | 2,817 |
| Pó de Pedra | 2,790 |

4.1.1.3 Desgaste por Abrasão *Los Angeles* e Equivalente de Areia

Foram realizados ensaios com a graduação “B”, sua respectiva carga abrasiva e número de rotações do tambor, preparada apenas com material passante na peneira com abertura da malha quadrada de 19,0 mm e retido na de 9,5 mm, é de 4.584 g \pm 25 g e 500 rotações do tambor. O resultado do ensaio é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4-3 : Resultados dos ensaios de abrasão *Los Angeles* realizados com a brita 19,0 mm.

| Passando | Retido | Graduação B |
|--------------------------------|--------|----------------|
| 19,0 | 12,5 | 2500 \pm 10 |
| 12,5 | 9,5 | 2500 \pm 10 |
| Massas totais (g) | | 5000 \pm 10 |
| Número de rotações do tambor | | 500 |
| Número de esferas | | 11 |
| Carga abrasiva (g) | | 4.584 \pm 25 |
| Abrasão <i>Los Angeles</i> (%) | | 55,87% |

O resultado obtido nesse ensaio é superior ao limite estabelecido pelo DNIT para uso em concretos asfálticos estabelecidos em sua Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a), que é de 50% para o desgaste *Los Angeles*. Entretanto, a norma permite a excepcionalidade para valores maiores, caso estes tenham apresentado desempenho satisfatório em utilização anterior, que é o caso do material. O equivalente de areia obtido para o pó de pedra foi de 67,5%.

A Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a) para pavimento flexíveis não cita valores de absorção para os agregados. No entanto, a absorção está diretamente relacionada com a porcentagem de interstícios ou porosidade existente na massa cristalina das partículas.

4.2 CARACTERÍSTICA FÍSICA E REOLÓGICA DO LIGANTE

De acordo com os ensaios realizados no laboratório da própria refinaria, apresentados na Tabela 4.4, o CAP usado nesta pesquisa atende às especificações brasileiras regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2006).

Tabela 4-4 : Resultados da caracterização do CAP utilizado na pesquisa.

| CARACTERÍSTICA | MÉTODO | ESPECIFICAÇÃO | RESULTADO | UNIDADE |
|---|---------------|---------------|-----------|---------|
| Penetração | D 5 | 50 a 70 | 55 | 0,1 mm |
| Ponto de amolecimento | D 36 | 46 min | 50,2 | °C |
| Viscosidade Brookfield a 135 °C- sp 21 20 rpm | | 274 min | 342 | cP |
| Viscosidade Brookfield a 150 °C- sp 21 | D 4402 | 112 min | 176 | cP |
| Viscosidade Brookfield a 177 °C - sp 21 | | 57 a 285 | 66 | cP |
| RTFOT - penetração retida | D 5 | 55 min | 64 | % |
| RTFOT- aumento do ponto de amolecimento | D 36 | 8 max | 3,6 | °C |
| RTFOT - ductilidade a 25 °C | D 113 | 20 min | 110 | cm |
| RTFOT - variação em % massa | D 2872 | -0,50 a 0,50 | 0,002 | % |
| Ductilidade a 25 °C | D 113 | 60 min | >150 | cm |
| Solubilidade no Tricloroetileno | D 2042 | 99,5 min | 99,9 | °C |
| Ponto de Fulgor | D 92 | 235 min | 348 | °C |
| Índice de Suscetibilidade Térmica | X 018 | -1,5 a 0,7 | -0,9 | N/A |
| Densidade Relativa a 20/4 °C | D 70 | - | 1,01 | N/A |
| Aquecimento a 177 °C | X 215 | - | NESP | N/A |

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA CAL E DOS RESÍDUOS DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS (RBRO) E ESCÓRIA MOÍDA DE ACIARIA (EMA)

4.3.1 Granulometria

Para a presente pesquisa, foram utilizados a Cal e dois tipos de resíduos industriais, isto é, o resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais (RBRO) e as escórias moída de aciaria (EMA). O ensaio de diâmetro das partículas, foi realizado por difratometria a Laser – espalhamento de luz laser de baixo ângulo, e o equipamento utilizado foi o Master Size Micro, modelo MAF5000, com faixa de aplicação de 0,3 a 300 microns e os resultados apresentados conforme figuras 4.2 a 4.4, para RBRO, EMA e Cal.

Figura 4-2 : Diâmetro das partículas do RBRO.

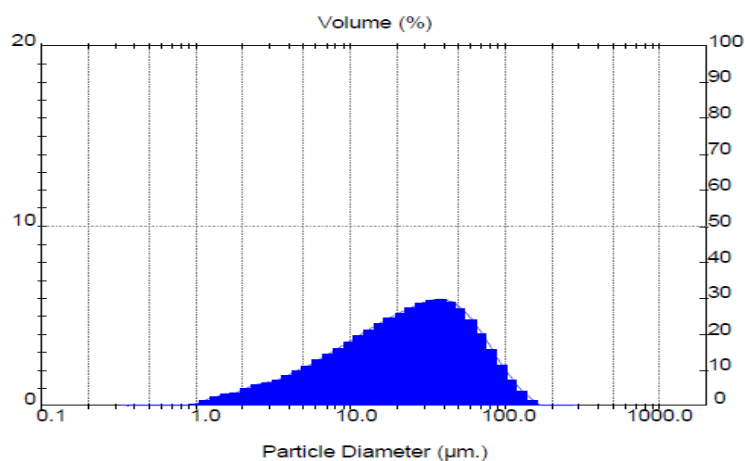


Figura 4-3 : Diâmetro das partículas de EMA.

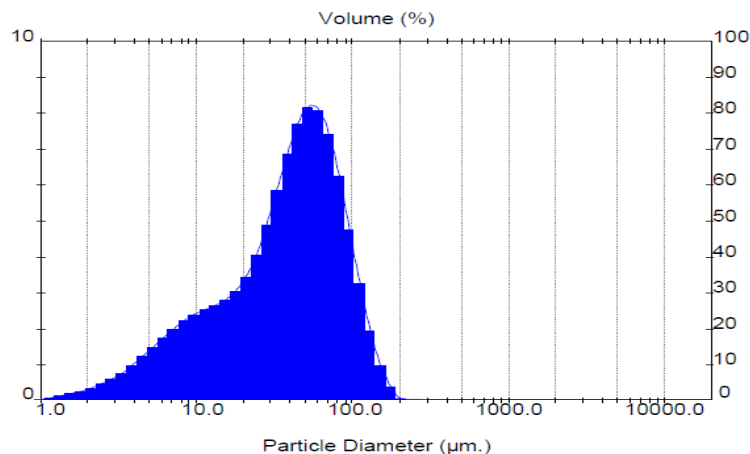
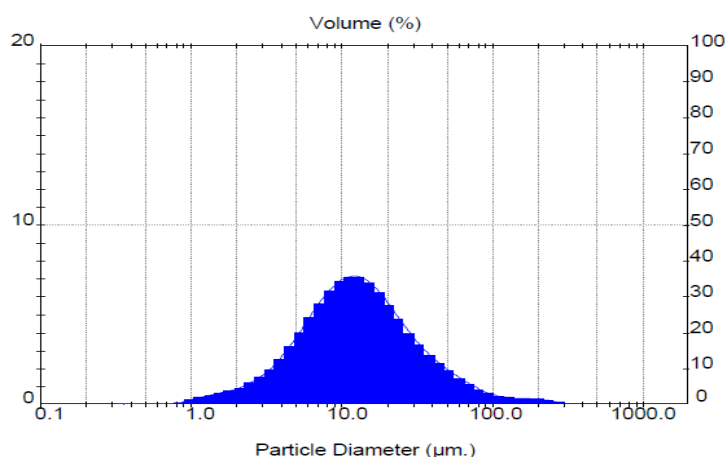


Figura 4-4 : Diâmetro das partículas da Cal.



O que podemos observar do resultado do ensaio do diâmetro das partículas é que as partículas de RBRO estão contidas entre 100,0µm e 1,0µm assim distribuídos onde a maior concentração das partículas cerca de 30% do volume está concentrada no diâmetro 40,0µm. As partículas de EMA estão contidas entre 100,0µm e 1,0µm assim distribuídos onde a maior concentração das partículas cerca de 80% do volume está concentrada no diâmetro 70,0µm e as partículas de Cal estão contidas entre 100,0µm e 1,0µm assim distribuídos onde a maior concentração das partículas cerca de 35% do volume está concentrada no diâmetro 10,0µm. Verificamos assim que nesta pesquisa as partículas de Cal são as mais finas, seguidas das partículas de RBRO e por último as partículas de EMA. Conforme já mencionado, todo o material utilizado nesta pesquisa foi peneirado na peneira quadrada de malha nº 200, ou seja tem o diâmetro inferior a 0,075 mm. Por definição, fíler é um material mineral inerte em relação aos demais componentes da mistura, finamente dividido, passando pelo menos 65% na peneira de 75 µm de abertura de malha quadrada conforme DNER EM 367/97 (DNER, 1997c)

4.3.2 Análise Mineralógica

Análise mineralógica por difração de raio X na Cal e nos resíduos de RBRO e EMA, foram realizadas no equipamento de difração de Raios-X Discover D8 - Marca Bruker, operando com uma tensão de 30Kv e 40 mA em uma região angular 2θ de 10 - 80°. A análise de DRX foram comparados e analisados com as fichas cristalográficas JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*) do *International Centre for*

Diffraction Data, disponíveis no software PCPDFWIN versão 2.3. O equipamento está instalado no Campus da UFES no laboratório LABPETRO. Seguem resultados das características mineralógicas das amostras de RBRO, EMA e Cal, conforme figuras 4.5 a 4.7.

Figura 4-5 : Características mineralógicas das partículas de RBRO.

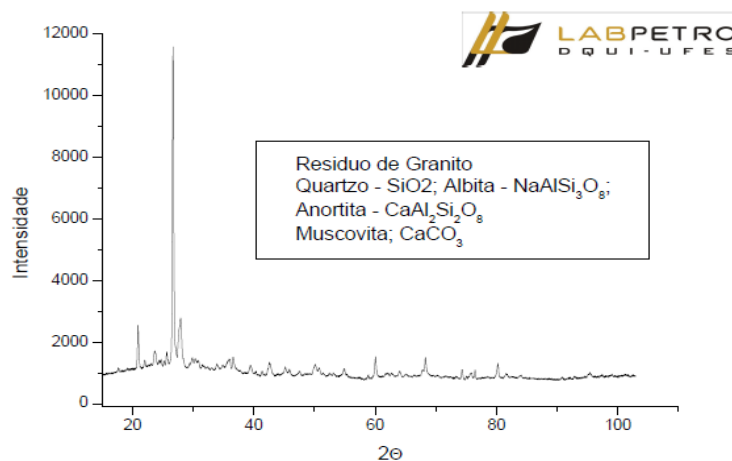


Figura 4-6 : Características mineralógicas das partículas da EMA.

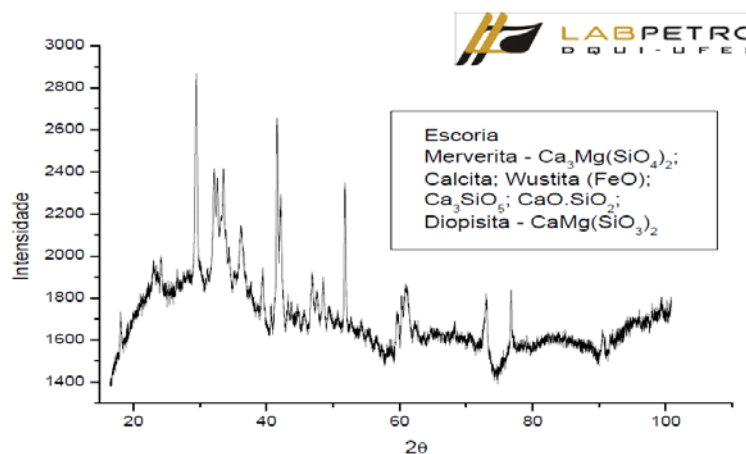
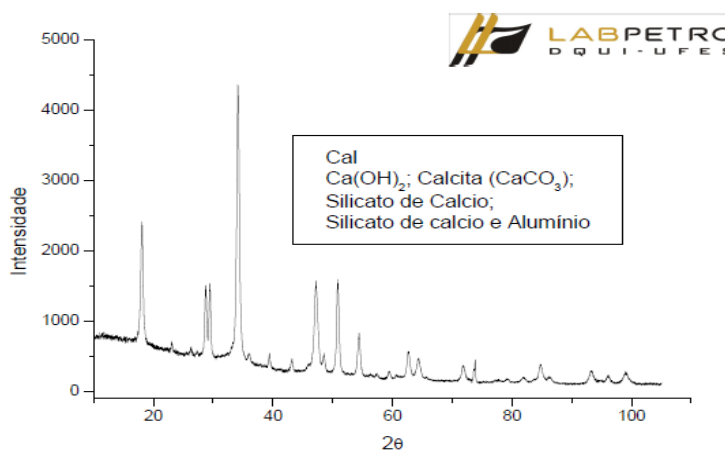


Figura 4-7 : Características mineralógicas das partículas da Cal.



Pode-se observar nas características mineralógicas do RBRO, a grande quantidade de SiO_2 o que era de se esperar face ao material ser proveniente de exploração de Granito. A mineralogia do resíduo de EMA mostra picos de materiais que se apresentam em quantidades mais distribuídas entre a Merverita, Calcita, Wustita e Diopisita. Na amostra de Cal temos a Calcita em maior quantidade e os Silicatos de Cálcio e Alumínio. De posse desses resultados, pode-se dizer que a presença de cal nas amostras pode representar um aspecto positivo no comportamento mecânico dos CA uma vez que é comprovado os efeitos benéficos da adição de cal em Concretos Asfáltico.

4.3.3 Massa Específica Real

A massa específica real foi determinada por meio do método de ensaio DNER-ME 085/94 (DNER, 1994a), o qual consiste na relação entre uma massa de aproximadamente 60 g e o deslocamento da coluna de querosene no frasco *Le Chatelier*. O valor obtido para a Cal foi de 2,293 g/cm³, para o RBRO foi de 2,639 g/cm³, para a EMA de 3,425 g/cm³ e para a mistura de 50% de EMA e 50% de RBRO foi de 2,848 g/cm³. Os resíduos não se mostraram solúveis, quando imersos no querosene.

4.3.4 Determinação da Finura pelo Método da Permeabilidade ao Ar

A Finura das partículas foi determinada por meio do método de ensaio ABNT NM 76 (ABNT, 1998), o qual consiste na determinação da finura pelo método da permeabilidade ao ar. O valor obtido para a Cal foi de 12.317 cm²/g, para o RBRO foi de 5.443 cm²/g, para a EMA de 3.469 cm²/g e para a mistura de 50% de EMA e 50% de RBRO foi de 4.046 cm²/g.

Como pode-se observar o valor da finura dos resíduos RBRO e EMA foi inferior ao da cal, o que pode levar a um acréscimo no teor de ligante, o que de fato aconteceu.

4.4 PARAMETROS DA DOSAGEM MARSHALL

Para atingir o objetivo inicial desta pesquisa foi necessário identificar o teor ótimo de CAP para a mistura de referência e as com adição de cal e de resíduos de RBRO e EMA, contemplando as variações de 0%, 2%, 3% e 4%. Os teores foram determinados pela metodologia *Marshall* segundo a NBR 12891 (ABNT, 1993). O planejamento experimental considerou 11 misturas de acordo com a Tabela 4.5.

Tabela 4-5 : Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura.

| Mistura | Porcentagem de Resíduo em Peso da Mistura (%) |
|------------|--|
| Referência | 0% |
| Cal | 2% |
| RBRO | 2% |
| | 3% |
| | 4% |
| EMA | 2% |
| | 3% |
| | 4% |
| 50% RBRO | 2% |
| + 50% | 3% |
| EMA | 4% |

Nesta metodologia busca-se o teor de ligante adequado para atender aos requisitos da norma adotada para avaliação da mistura. A especificação de referência para dosagem do concreto asfáltico adotada foi a Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a), que define a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento flexível de estradas de rodagem, pela confecção de mistura asfáltica a quente em usina apropriada utilizando ligante asfáltico, agregados e material de enchimento (fíler). Além disso estabelece-se também, os requisitos referentes aos materiais, equipamentos, execução e controle de qualidade dos materiais empregados, além das condições de conformidade e não-conformidade e de medição dos serviços.

Foram determinadas as propriedades volumétricas de cada mistura e o seu o teor “ótimo” de CAP de projeto. Todos os corpos-de-prova foram moldados com soquete manual compactador *Marshall* aplicando-se 75 golpes em cada face dos CPs e as misturas com os teores de ligante de projetos previamente definidos para os ensaios mecânicos.

4.4.1 Composição das Misturas

A partir dos resultados da análise granulométrica dos agregados foram determinadas as proporções de brita 1, brita 0, granilha, pó de pedra, do cal e dos resíduos de RBRO e EMA para misturas do CA, observados os limites da faixa “C” do DNIT. O enquadramento de proporções dos materiais foi realizado por tentativas, selecionando-se as distribuições que se ajustassem aos limites da faixa. A faixa “C” foi escolhida por ser destinada à camada de rolamento, que é a aplicação mais comum das misturas asfálticas produzidas em usinas locais para pavimentação na cidade de Vila Velha e região metropolitana da Grande Vitória.

A composição do concreto asfáltico deve satisfazer aos requisitos da Tabela 4.6 com as respectivas tolerâncias no que diz respeito à granulometria, conforme DNER-ME 083/98 (DNER, 1998c) e aos percentuais do ligante asfáltico determinados pelo projeto da mistura. A faixa usada deve ser aquela, cujo diâmetro máximo é inferior a $\frac{2}{3}$ da espessura da camada.

As porcentagens de ligante se referem à mistura de agregados, considerada como 100%. Para todos os tipos a fração retida entre duas peneiras consecutivas não deve ser inferior a 4% do total.

Tabela 4-6 : Faixas Granulométricas do concreto asfáltico do DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

| PENEIRA DE MALHA QUADRADA | | % EM MASSA PASSANDO | | | |
|---|------------------|---|--|-------------------------------------|-------------|
| Série ASTM | Abertura (mm) | Faixa A | Faixa B | Faixa C | Tolerâncias |
| 2" | 50,8 | 100 | - | - | - |
| 1 ½ " | 38,1 | 95-100 | 100 | - | ± 7% |
| 1" | 25,4 | 75-100 | 95-100 | - | ± 7% |
| ¾" | 19,1 | 60-90 | 80-100 | 100 | ± 7% |
| ½" | 12,7 | - | - | 80-100 | ± 7% |
| 3/8" | 9,5 | 35-65 | 45-80 | 70-90 | ± 7% |
| Nº 4 | 4,8 | 25-50 | 28-60 | 44-72 | ± 5% |
| Nº 10 | 2 | 20-40 | 20-45 | 22-50 | ± 5% |
| Nº 40 | 0,42 | 10-30 | 10-32 | 8-26 | ± 5% |
| Nº 80 | 0,18 | 5-20 | 8-20 | 4-16 | ± 3% |
| Nº 200 | 0,075 | 1-8 | 3-8 | 2-10 | ± 2% |
| Asfalto Solúvel no CS ₂ (+) (%) | | 4,0 - 7,0 Camada de Ligação (Binder) | 4,5 - 7,5 Camada de Ligação e Rolamento | 4,5 - 9,0 Camada de Rolamento | ± 0,3% |

Fonte: DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

Devem ser observados os valores limites para as características especificadas na Tabela 4.7 seguir:

Tabela 4-7 : Parâmetros de dosagem de concreto asfáltico do DNIT ES - 031/2006.

| CARACTERÍSTICAS | MÉTODO DE ENSAIO | CAMADA DE ROLAMENTO | CAMADA DE LIGAÇÃO |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------|
| Vv, % | DNER-ME 043/95 (DNER, 1995a) | 3 - 5 | 4 - 6 |
| RBV, % | DNER-ME 043/95 (DNER, 1995a) | 75 - 82 | 65 - 72 |
| Estabilidade mín., Kgf (75 golpes) | DNER-ME 043/95 (DNER, 1995a) | 500 | 500 |
| RT a 25°C, mín., MPa | DNER-ME 138/94 (DNER, 1994e) | 0,65 | 0,65 |

Fonte: DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

As misturas devem atender às especificações da relação betume/vazios ou aos mínimos de vazios do agregado mineral, dados pela Tabela 4.8.

Tabela 4-8 : Valores de Vazios do Agregado Mineral DNIT ES - 031/2006 (DNIT, 2006a).

| VAM – Vazios do Agregado Mineral | | |
|------------------------------------|------|--------------|
| Tamanho Nominal Máximo do agregado | | VAM Mínimo % |
| # | m m | |
| 1½" | 38,1 | 15 |
| 1" | 25,4 | 16 |
| ¾" | 19,1 | 17 |
| ½" | 12,7 | 18 |
| 3/8" | 9,5 | 20 |

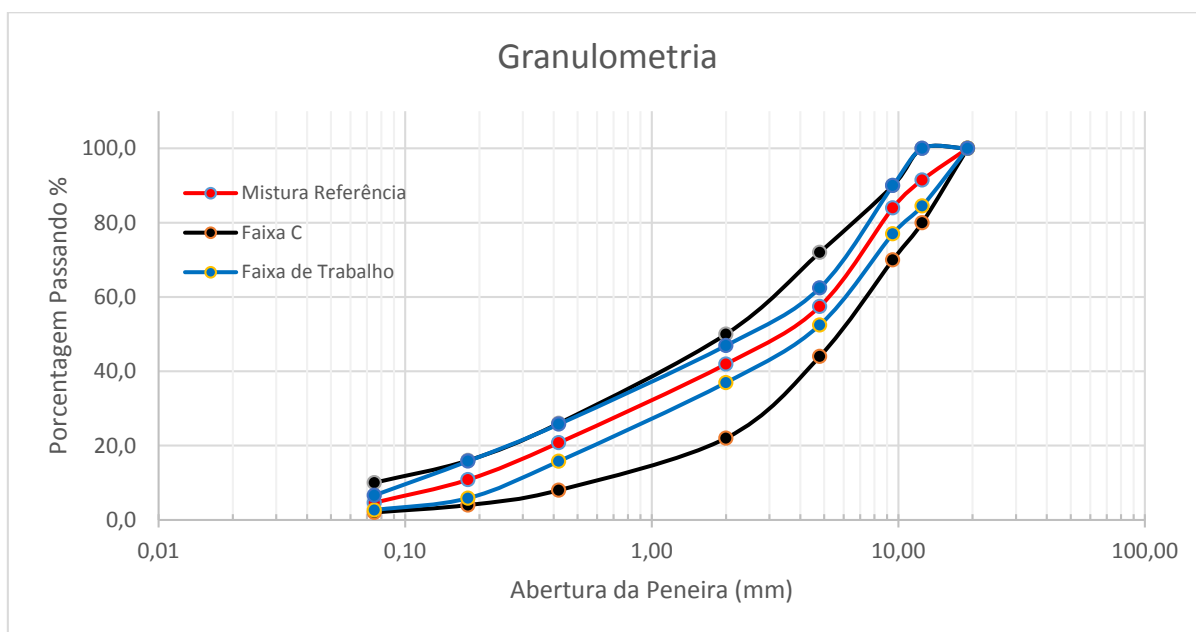
Fonte: DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

A distribuição granulométrica da mistura com 0% de resíduo está apresentada na Tabelas 4.9 e na Figura 4.8 nas quais se mostram também os limites da faixa “C” e as Faixas de Trabalho das misturas, conforme a Especificação de Serviço DNIT – ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

Tabela 4-9 : Distribuição granulométrica da mistura de referência.

| PENEIRA DE MALHA QUADRADA | | PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------------------------------|--------|----------|----------|-------|-----------|----------------|----------|----------------------|
| | | PROPORÇÃO DE AGREGADOS (%) | | | | | | FAIXA C - DNIT | | |
| SÉRIE | ABERTURA | B1 | B0 | GRANILHA | PÓ PEDRA | FÍLER | MISTURA | LIMITE | | TOLERÂNCIAS DA FAIXA |
| ASTM | (mm) | 13,70% | 22,50% | 19,60% | 44,20% | 0% | SEM FÍLER | INFERIOR | SUPERIOR | |
| 1" | 25,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ¾" | 19,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ½" | 12,5 | 37,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 91,5 | 80,0 | 100,0 | ± 7 |
| 3/8" | 9,5 | 13,1 | 88,5 | 92,2 | 100,0 | 100,0 | 84,0 | 70,0 | 90,0 | ± 7 |
| Nº 4 | 4,8 | 6,8 | 18,5 | 44,0 | 98,9 | 100,0 | 57,5 | 44,0 | 72,0 | ± 5 |
| Nº 10 | 2,0 | 5,3 | 4,4 | 23,3 | 80,7 | 100,0 | 41,9 | 22,0 | 50,0 | ± 5 |
| Nº 40 | 0,420 | 3,6 | 2,2 | 11,4 | 39,7 | 100,0 | 20,8 | 8,0 | 26,0 | ± 5 |
| Nº 80 | 0,180 | 2,4 | 1,4 | 6,9 | 20,0 | 100,0 | 10,8 | 4,0 | 16,0 | ± 3 |
| Nº 200 | 0,075 | 1,4 | 0,8 | 3,1 | 8,3 | 100,0 | 4,6 | 2,0 | 10,0 | ± 2 |

Figura 4-8 : Enquadramento da mistura de referência na faixa C do DNIT.

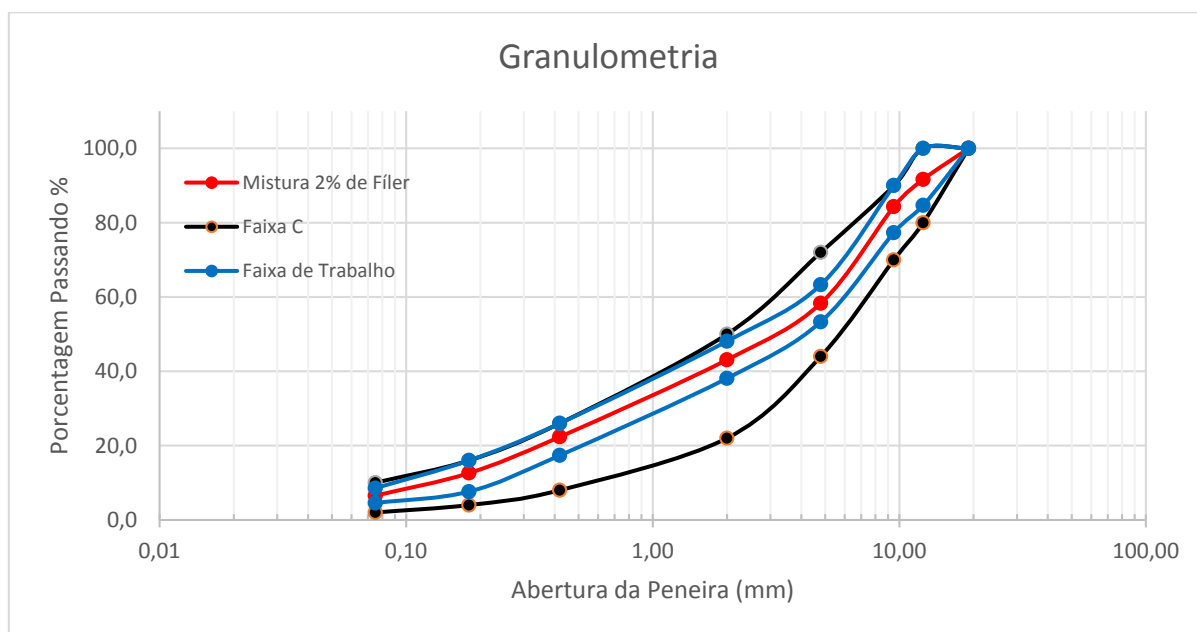


A distribuição granulométrica da mistura com 2% de resíduo está apresentada na Tabelas 4.10 e na Figura 4.9 nas quais se mostram também os limites da faixa “C” e as Faixas de Trabalho das misturas, conforme a Especificação de Serviço DNIT – ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

Tabela 4-10 : Distribuição granulométrica das misturas com 2% de Cal ou Resíduo.

| PENEIRA DE MALHA QUADRADA | | PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------------------------------|--------|----------|----------|-------|----------|----------------|----------|-----|
| | | PROPORÇÃO DE AGREGADOS (%) | | | | | | FAIXA C - DNIT | | |
| SÉRIE | ABERTURA | B1 | B0 | GRANILHA | PÓ PEDRA | FÍLER | MISTURAS | LIMITE | | |
| ASTM | (mm) | 13,43% | 22,05% | 19,21% | 43,32% | 2,0% | COM 2% | INFERIOR | SUPERIOR | |
| 1" | 25,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ¾" | 19,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ½" | 12,5 | 37,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 91,7 | 80,0 | 100,0 | ± 7 |
| 3/8" | 9,5 | 13,1 | 88,5 | 92,2 | 100,0 | 100,0 | 84,3 | 70,0 | 90,0 | ± 7 |
| Nº 4 | 4,8 | 6,8 | 18,5 | 44,0 | 98,9 | 100,0 | 58,3 | 44,0 | 72,0 | ± 5 |
| Nº 10 | 2,0 | 5,3 | 4,4 | 23,3 | 80,7 | 100,0 | 43,1 | 22,0 | 50,0 | ± 5 |
| Nº 40 | 0,420 | 3,6 | 2,2 | 11,4 | 39,7 | 100,0 | 22,4 | 8,0 | 26,0 | ± 5 |
| Nº 80 | 0,180 | 2,4 | 1,4 | 6,9 | 20,0 | 100,0 | 12,6 | 4,0 | 16,0 | ± 3 |
| Nº 200 | 0,075 | 1,4 | 0,8 | 3,1 | 8,3 | 100,0 | 6,5 | 2,0 | 10,0 | ± 2 |

Figura 4-9 : Enquadramento da mistura com 2% de Cal ou Resíduo na faixa C do DNIT.

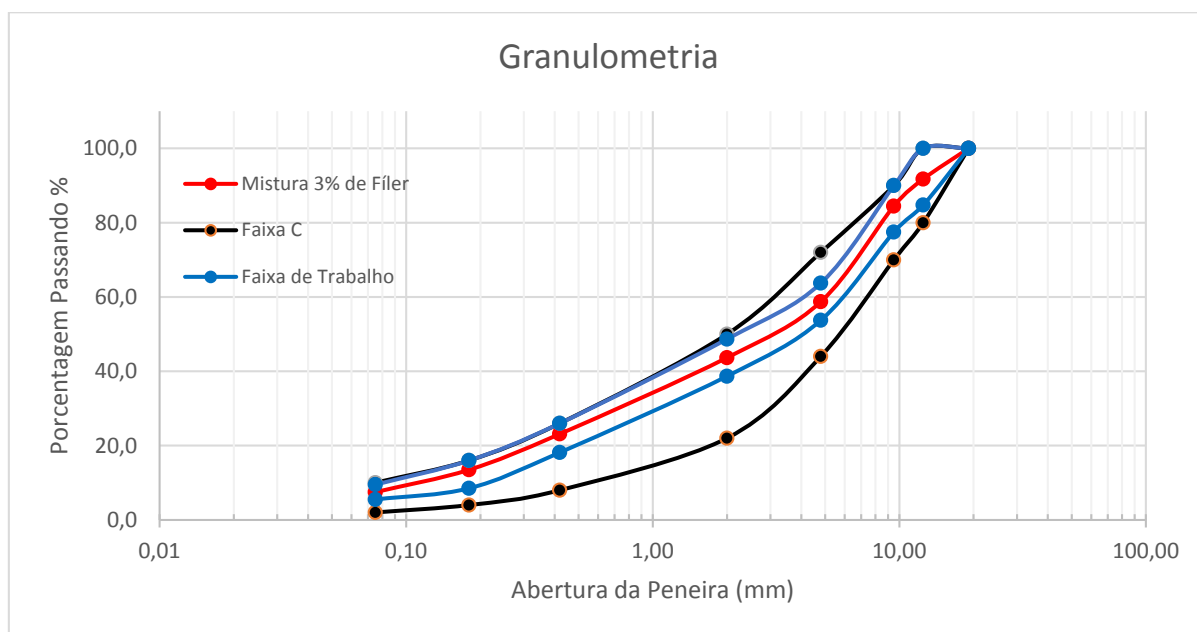


A distribuição granulométrica da mistura com 3% de resíduo está apresentada na Tabelas 4.11 e na Figura 4.10 nas quais se mostram também os limites da faixa “C” e as Faixas de Trabalho das misturas, conforme a Especificação de Serviço DNIT – ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

Tabela 4-11 : Distribuição granulométrica das misturas com 3% de Resíduo.

| PENEIRA DE MALHA QUADRADA | | PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------------------------------|--------|----------|----------|-------|----------|----------------|----------|----------------------|
| | | PROPORÇÃO DE AGREGADOS (%) | | | | | | FAIXA C - DNIT | | |
| SÉRIE | ABERTURA | B1 | B0 | GRANILHA | PÓ PEDRA | FÍLER | MISTURAS | LIMITE | | TOLERÂNCIAS DA FAIXA |
| ASTM | (mm) | 13,29% | 21,83% | 19,01% | 42,87% | 3,0% | COM 3% | INFERIOR | SUPERIOR | |
| 1" | 25,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ¾" | 19,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ½" | 12,5 | 37,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 91,7 | 80,0 | 100,0 | ± 7 |
| 3/8" | 9,5 | 13,1 | 88,5 | 92,2 | 100,0 | 100,0 | 84,5 | 70,0 | 90,0 | ± 7 |
| Nº 4 | 4,8 | 6,8 | 18,5 | 44,0 | 98,9 | 100,0 | 58,7 | 44,0 | 72,0 | ± 5 |
| Nº 10 | 2,0 | 5,3 | 4,4 | 23,3 | 80,7 | 100,0 | 43,7 | 22,0 | 50,0 | ± 5 |
| Nº 40 | 0,420 | 3,6 | 2,2 | 11,4 | 39,7 | 100,0 | 23,2 | 8,0 | 26,0 | ± 5 |
| Nº 80 | 0,180 | 2,4 | 1,4 | 6,9 | 20,0 | 100,0 | 13,5 | 4,0 | 16,0 | ± 3 |
| Nº 200 | 0,075 | 1,4 | 0,8 | 3,1 | 8,3 | 100,0 | 7,5 | 2,0 | 10,0 | ± 2 |

Figura 4-10 : Enquadramento da mistura com 3% de Resíduo na faixa C do DNIT.

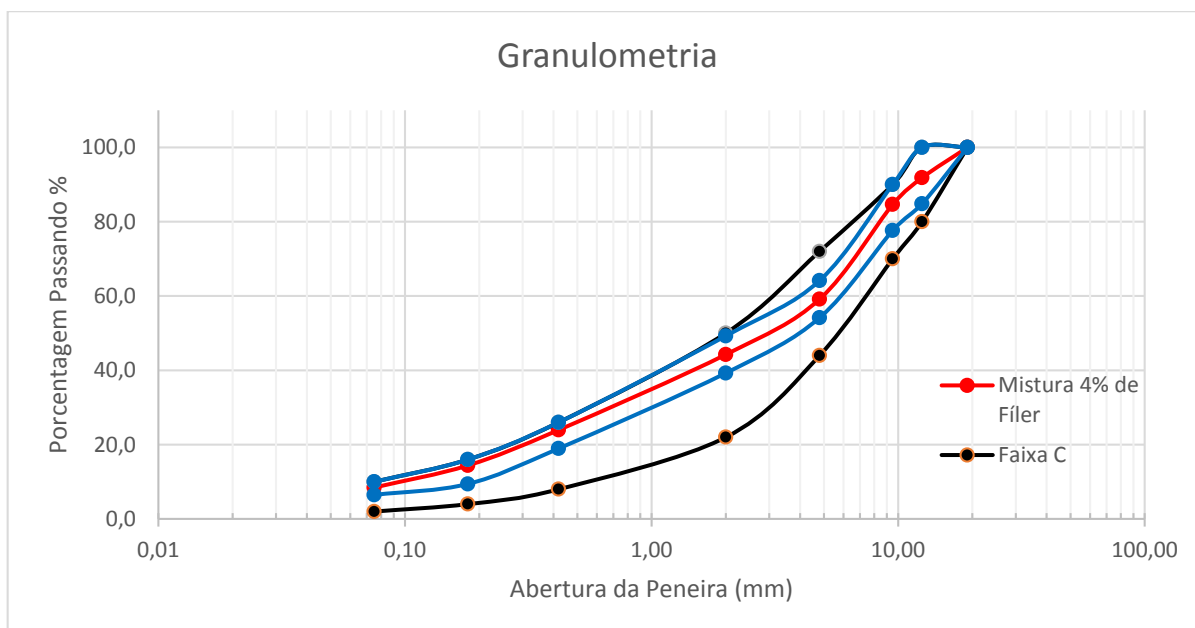


A distribuição granulométrica da mistura com 4% de resíduo está apresentada na Tabelas 4.12 e na Figura 4.11 nas quais se mostram também os limites da faixa “C” e as Faixas de Trabalho das misturas, conforme a Especificação de Serviço DNIT – ES 031/2006 (DNIT, 2006a).

Tabela 4-12 : Distribuição granulométrica das misturas com 4% de Resíduo.

| PENEIRA DE MALHA QUADRADA | | PORCENTAGEM DE MATERIAL PASSANDO | | | | | | | | |
|---------------------------|----------|----------------------------------|--------|----------|----------|-------|---------|----------------|----------|----------|
| | | PROPORÇÃO DE AGREGADOS (%) | | | | | | FAIXA C - DNIT | | |
| SÉRIE | ABERTURA | B1 | B0 | GRANILHA | PÓ PEDRA | FÍLER | MISTURA | LIMITE | | |
| ASTM | (mm) | 13,15% | 21,60% | 18,82% | 42,43% | 4,0% | COM 4% | INFERIOR | SUPERIOR | DA FAIXA |
| 1" | 25,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ¾" | 19,1 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | ± 7 |
| ½" | 12,5 | 37,9 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 91,8 | 80,0 | 100,0 | ± 7 |
| 3/8" | 9,5 | 13,1 | 88,5 | 92,2 | 100,0 | 100,0 | 84,6 | 70,0 | 90,0 | ± 7 |
| Nº 4 | 4,8 | 6,8 | 18,5 | 44,0 | 98,9 | 100,0 | 59,2 | 44,0 | 72,0 | ± 5 |
| Nº 10 | 2,0 | 5,3 | 4,4 | 23,3 | 80,7 | 100,0 | 44,3 | 22,0 | 50,0 | ± 5 |
| Nº 40 | 0,420 | 3,6 | 2,2 | 11,4 | 39,7 | 100,0 | 24,0 | 8,0 | 26,0 | ± 5 |
| Nº 80 | 0,180 | 2,4 | 1,4 | 6,9 | 20,0 | 100,0 | 14,4 | 4,0 | 16,0 | ± 3 |
| Nº 200 | 0,075 | 1,4 | 0,8 | 3,1 | 8,3 | 100,0 | 8,4 | 2,0 | 10,0 | ± 2 |

Figura 4-11 : Enquadramento da mistura com 4% de Resíduo na faixa C do DNIT.

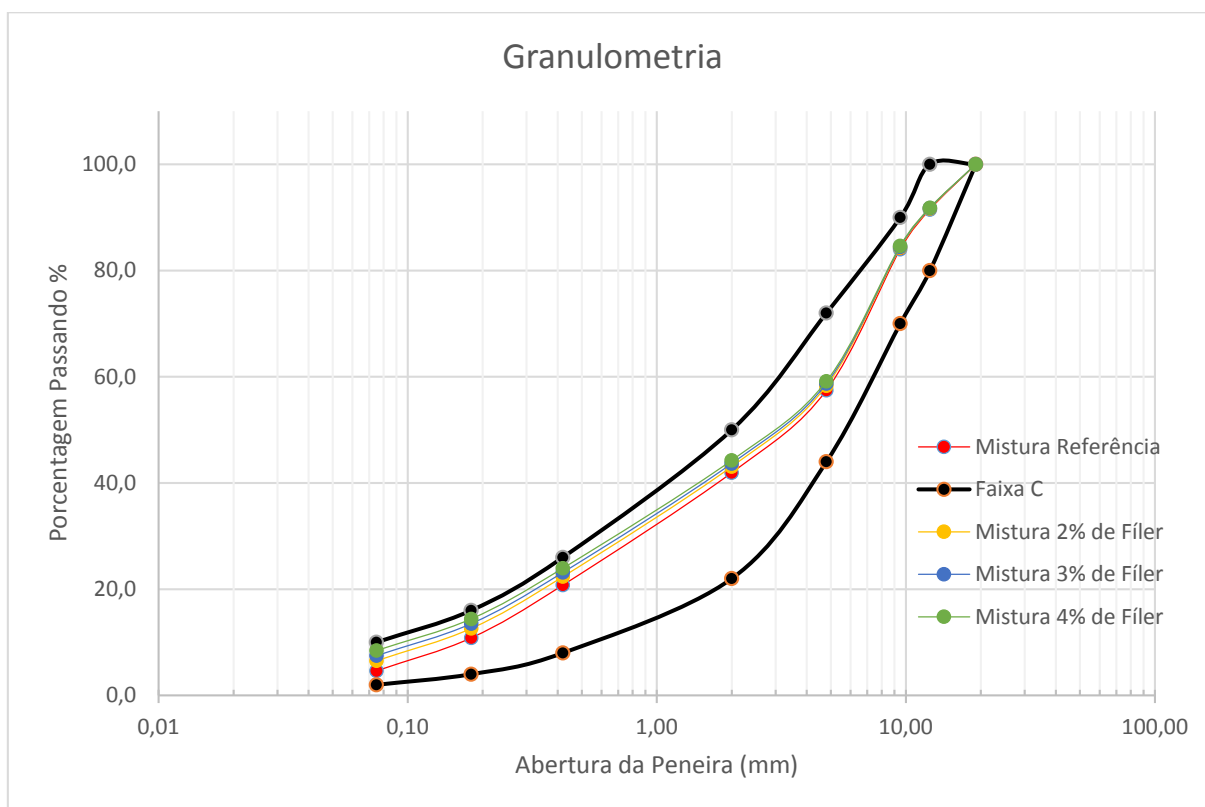


As composições das onze misturas analisadas estão apresentadas resumidamente na Tabela 4.13. Na Figura 4.12 estão as distribuições granulométricas das onze misturas (0%, 2%, 3% e 4%) assim como os limites da faixa “C” do DNIT.

Tabela 4-13 : Composição das onze misturas estudadas.

| Mistura | Brita 1 | Brita 0 | Pó de Pedra | Granilha | Resíduos |
|--------------------------|---------|---------|-------------|----------|----------|
| Referência | 13,70% | 22,50% | 19,60% | 44,20% | 0,0% |
| 2% Cal | 13,43% | 22,05% | 19,21% | 43,32% | 2,0% |
| 2% RBRO – EMA - RBRO/EMA | 13,43% | 22,05% | 19,21% | 43,32% | 2,0% |
| 3% RBRO – EMA - RBRO/EMA | 13,29% | 21,83% | 19,01% | 42,87% | 3,0% |
| 4% RBRO – EMA - RBRO/EMA | 13,15% | 21,60% | 18,82% | 43,43% | 4,0% |

Figura 4-12 : Enquadramento das misturas 0%, 2%, 3% e 4% na faixa C do DNIT.



4.4.2 Determinação dos Teores Ótimos de CAP nas Misturas Asfálticas

A seguir são apresentados os resultados das dosagens *Marshall* realizadas para obtenção do teor ótimo de CAP para mistura de referência e para as misturas com adição de Cal e Resíduos de RBMO, EMA e RBMO/EMA.

Com os valores médios de Vv e RBV de cada grupo, apresentados nas Tabelas 4.14 a 4.24, foram traçados gráficos com o *software Excel* do teor de ligante (%) versus Vv (%) e RBV (%), conforme está mostrado nas Figuras 4.13 a 4.23. A partir das equações das linhas de tendência que relacionam o teor de CAP (%) com Vv (%) e RBV (%), foram determinados quatro teores de CAP (%), para os quatro valores limites preconizados na Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006^a) em cada mistura estudada, quais sejam, Vv entre 3,0% e 5,0%, e RBV entre 75,0% e 82,0%.

Tabela 4-14 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura de Referência.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,50% | 2,591 | 2,419 | 6,6% | 10,7% | 17,4% | 61,8% |
| 5,00% | 2,570 | 2,457 | 4,4% | 12,1% | 16,5% | 73,4% |
| 5,50% | 2,549 | 2,472 | 3,0% | 13,4% | 16,5% | 81,6% |
| 6,00% | 2,529 | 2,470 | 2,3% | 14,6% | 17,0% | 86,3% |
| 6,50% | 2,509 | 2,466 | 1,7% | 15,8% | 17,5% | 90,3% |

Figura 4-13 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura de referência.

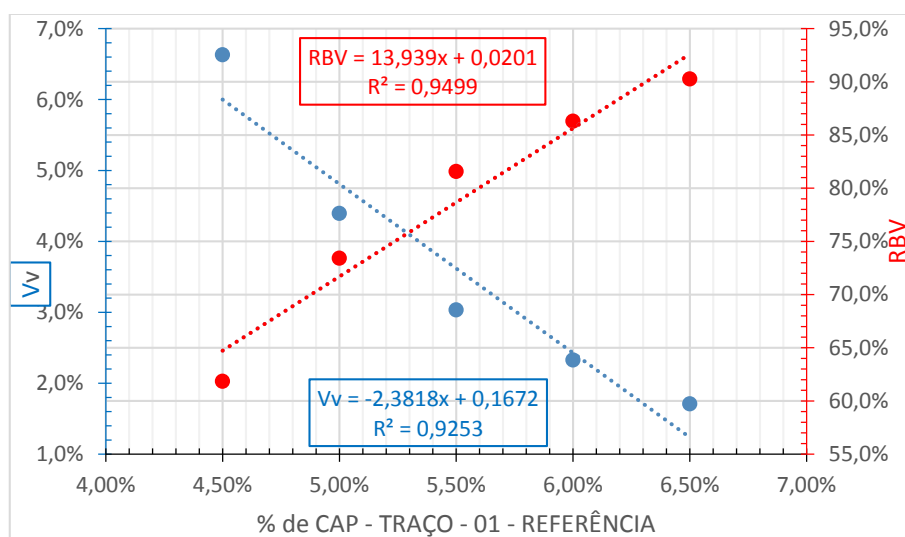


Tabela 4-15 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de Cal.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,602 | 2,428 | 6,7% | 9,6% | 16,3% | 58,8% |
| 4,50% | 2,581 | 2,466 | 4,4% | 11,0% | 15,4% | 71,2% |
| 5,00% | 2,560 | 2,472 | 3,4% | 12,2% | 15,6% | 78,0% |
| 5,50% | 2,540 | 2,482 | 2,3% | 13,5% | 15,8% | 85,6% |
| 6,00% | 2,520 | 2,486 | 1,3% | 14,7% | 16,1% | 91,6% |

Figura 4-14 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de Cal.

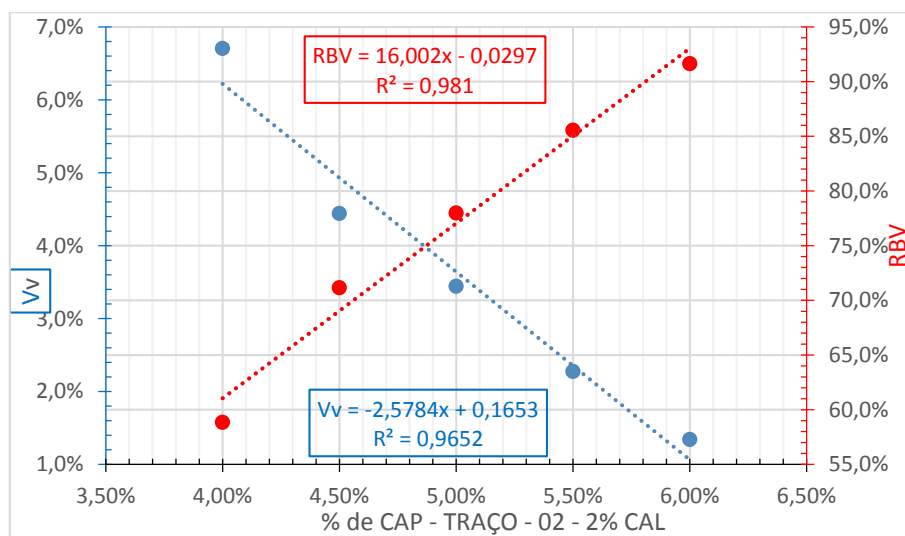


Tabela 4-16 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de RBRO.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,610 | 2,439 | 6,5% | 9,6% | 16,2% | 59,5% |
| 4,50% | 2,588 | 2,449 | 5,4% | 10,9% | 16,3% | 66,9% |
| 5,00% | 2,567 | 2,471 | 3,8% | 12,2% | 16,0% | 76,4% |
| 5,50% | 2,547 | 2,480 | 2,6% | 13,5% | 16,1% | 83,7% |
| 6,00% | 2,527 | 2,480 | 1,9% | 14,7% | 16,5% | 88,8% |

Figura 4-15 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de RBRO.

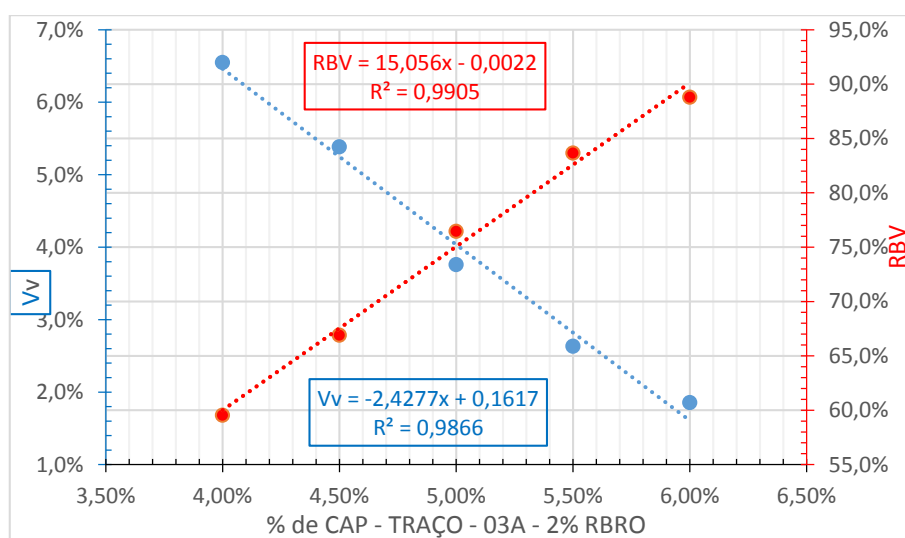


Tabela 4-17 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 3% de RBRO.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,50% | 2,587 | 2,451 | 5,2% | 10,9% | 16,1% | 67,5% |
| 5,00% | 2,566 | 2,474 | 3,6% | 12,2% | 15,8% | 77,3% |
| 5,50% | 2,545 | 2,488 | 2,2% | 13,5% | 15,8% | 85,8% |
| 6,00% | 2,525 | 2,494 | 1,2% | 14,8% | 16,0% | 92,3% |
| 6,50% | 2,505 | 2,485 | 0,8% | 15,9% | 16,8% | 95,2% |

Figura 4-16 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 3% de RBRO.

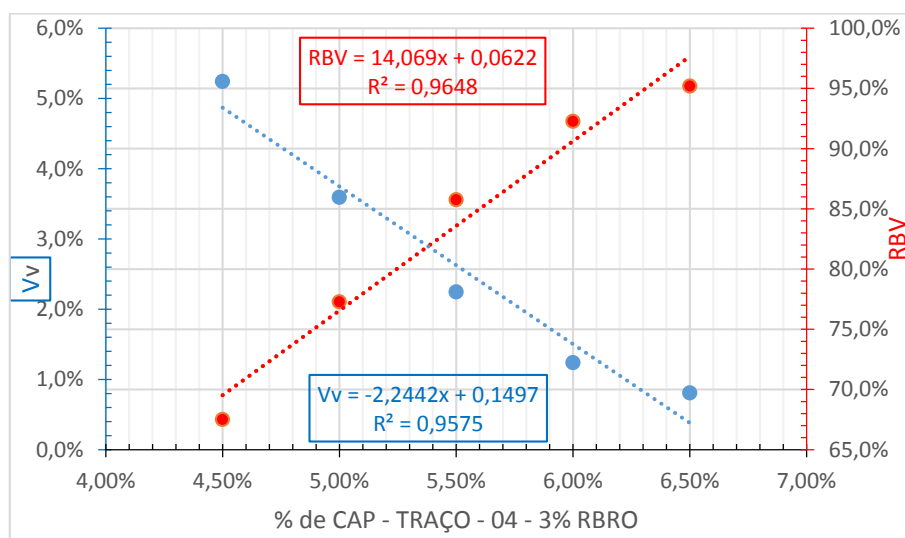


Tabela 4-18 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 4% de RBRO.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,50% | 2,585 | 2,449 | 5,3% | 10,9% | 16,1% | 67,4% |
| 5,00% | 2,564 | 2,477 | 3,4% | 12,2% | 15,6% | 78,2% |
| 5,50% | 2,544 | 2,485 | 2,3% | 13,5% | 15,8% | 85,4% |
| 6,00% | 2,524 | 2,478 | 1,8% | 14,7% | 16,5% | 89,1% |
| 6,50% | 2,504 | 2,478 | 1,0% | 15,9% | 16,9% | 93,9% |

Figura 4-17 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 4% de RBRO.

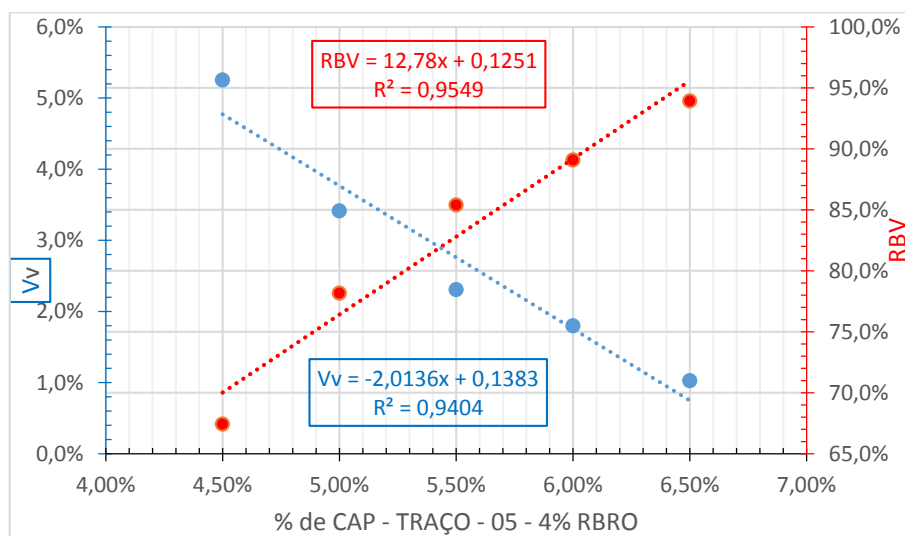


Tabela 4-19 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de EMA.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,620 | 2,443 | 6,8% | 9,6% | 16,4% | 58,7% |
| 4,50% | 2,599 | 2,456 | 5,5% | 10,9% | 16,4% | 66,4% |
| 5,00% | 2,578 | 2,472 | 4,1% | 12,2% | 16,3% | 74,9% |
| 5,50% | 2,557 | 2,494 | 2,5% | 13,5% | 16,0% | 84,6% |
| 6,00% | 2,537 | 2,495 | 1,7% | 14,8% | 16,4% | 89,9% |

Figura 4-18 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de EMA.

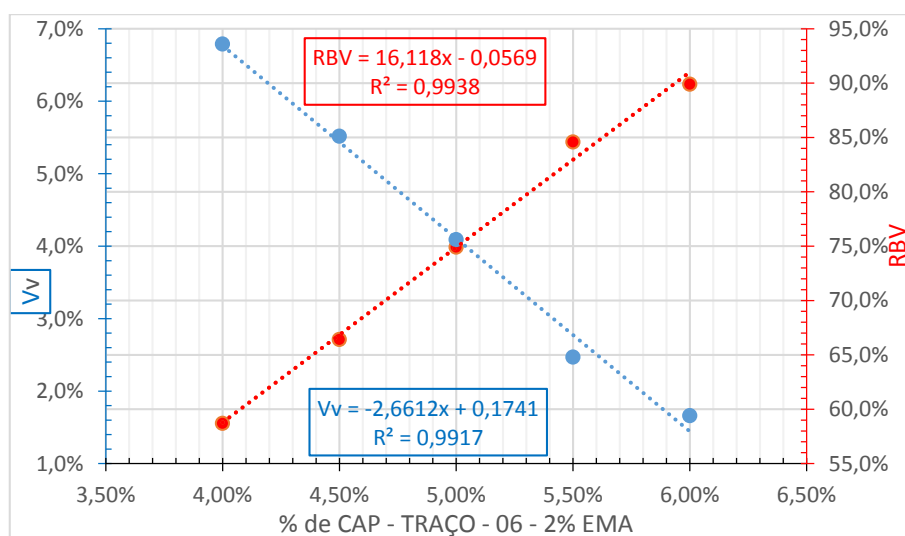


Tabela 4-20 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 3% de EMA.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,625 | 2,442 | 7,0% | 9,6% | 16,6% | 58,0% |
| 4,50% | 2,603 | 2,459 | 5,5% | 10,9% | 16,4% | 66,4% |
| 5,00% | 2,582 | 2,484 | 3,8% | 12,3% | 16,0% | 76,5% |
| 5,50% | 2,561 | 2,495 | 2,6% | 13,5% | 16,1% | 84,0% |
| 6,00% | 2,540 | 2,490 | 2,0% | 14,8% | 16,7% | 88,2% |

Figura 4-19 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 3% de EMA.

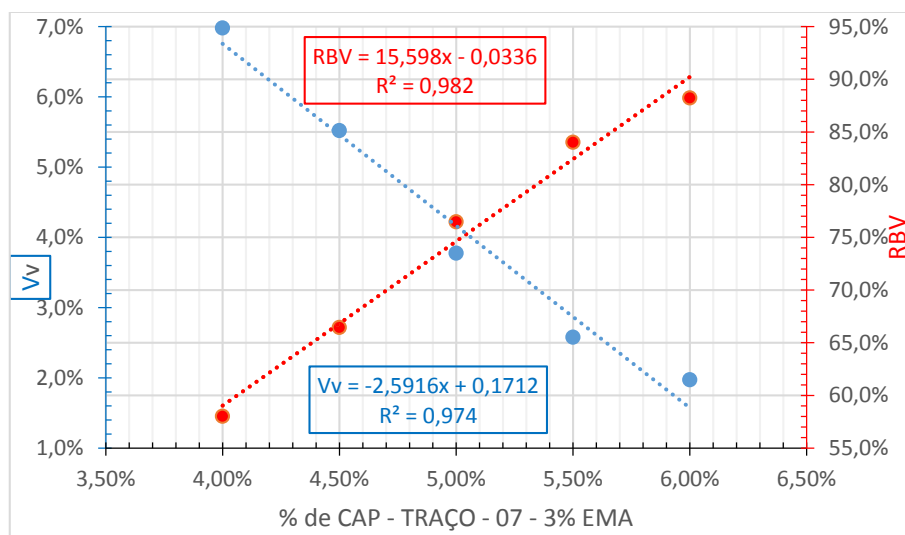


Tabela 4-21 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 4% de EMA.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,630 | 2,432 | 7,5% | 9,6% | 17,1% | 56,1% |
| 4,50% | 2,608 | 2,457 | 5,8% | 10,9% | 16,7% | 65,4% |
| 5,00% | 2,587 | 2,480 | 4,1% | 12,2% | 16,4% | 74,8% |
| 5,50% | 2,566 | 2,494 | 2,8% | 13,5% | 16,4% | 82,8% |
| 6,00% | 2,545 | 2,495 | 2,0% | 14,8% | 16,7% | 88,2% |

Figura 4-20 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 4% de EMA.

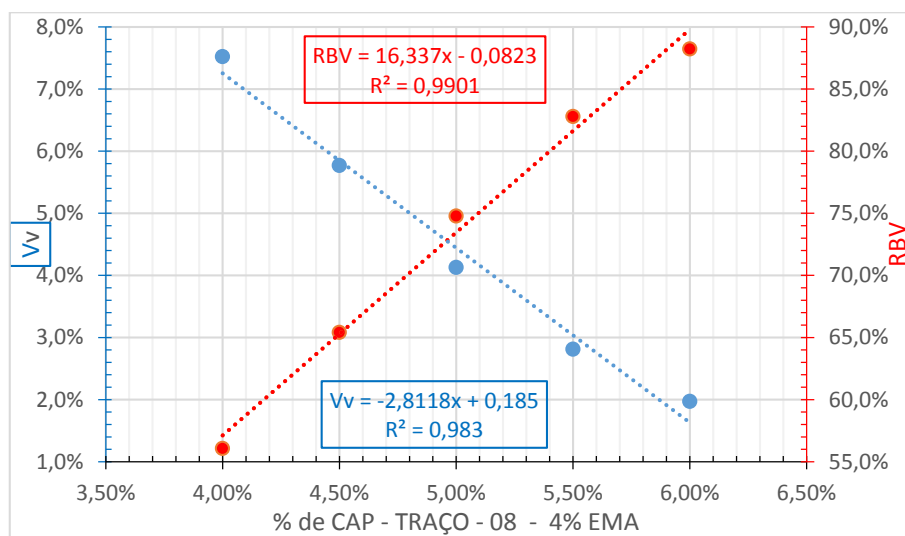


Tabela 4-22 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 2% de RBRO/EMA.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,613 | 2,437 | 6,7% | 9,6% | 16,4% | 58,8% |
| 4,50% | 2,592 | 2,461 | 5,0% | 10,9% | 16,0% | 68,4% |
| 5,00% | 2,571 | 2,474 | 3,8% | 12,2% | 16,0% | 76,5% |
| 5,50% | 2,550 | 2,483 | 2,6% | 13,5% | 16,1% | 83,6% |
| 6,00% | 2,530 | 2,489 | 1,6% | 14,7% | 16,4% | 90,2% |

Figura 4-21 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 2% de RBRO/EMA.

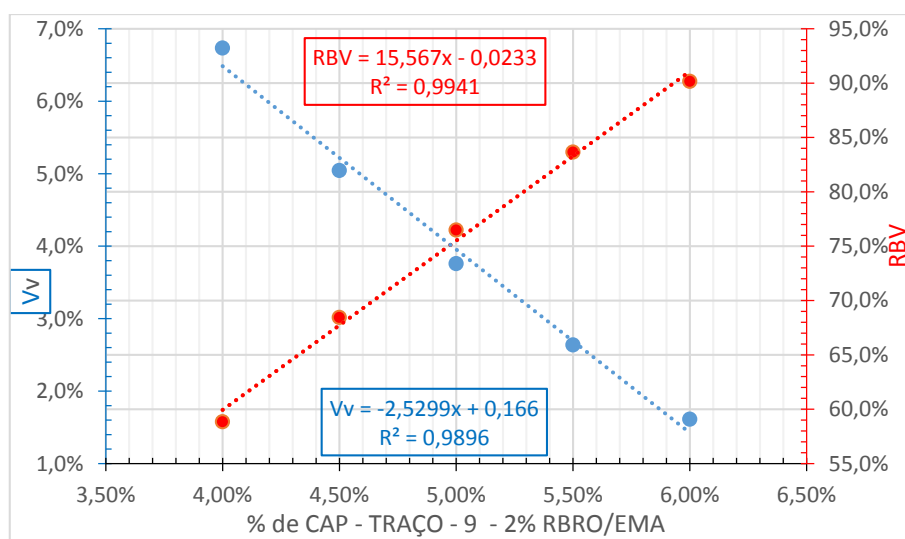


Tabela 4-23 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 3% de RBRO/EMA.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,613 | 2,456 | 6,0% | 9,7% | 15,7% | 61,8% |
| 4,50% | 2,592 | 2,470 | 4,7% | 11,0% | 15,7% | 70,0% |
| 5,00% | 2,571 | 2,487 | 3,3% | 12,3% | 15,5% | 79,0% |
| 5,50% | 2,550 | 2,498 | 2,0% | 13,6% | 15,6% | 87,0% |
| 6,00% | 2,530 | 2,495 | 1,4% | 14,8% | 16,1% | 91,6% |

Figura 4-22 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 3% de RBRO/EMA.

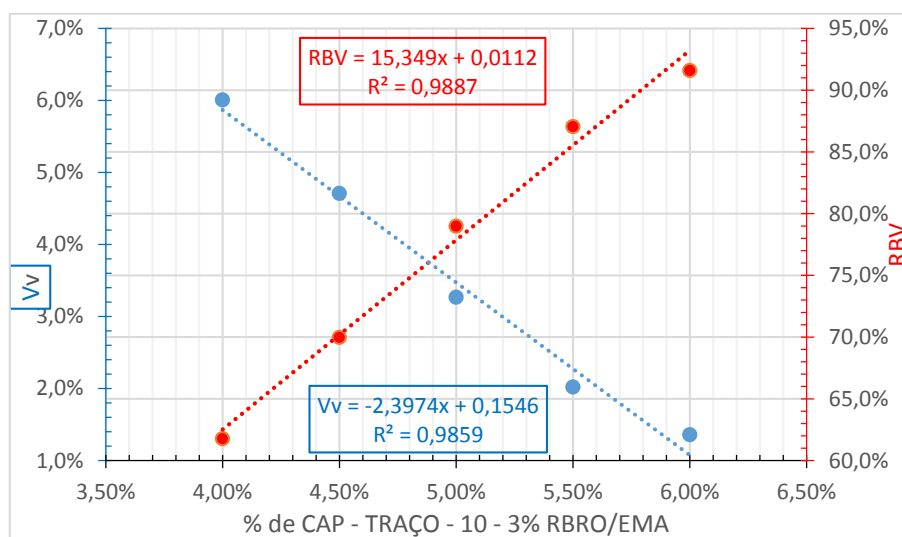
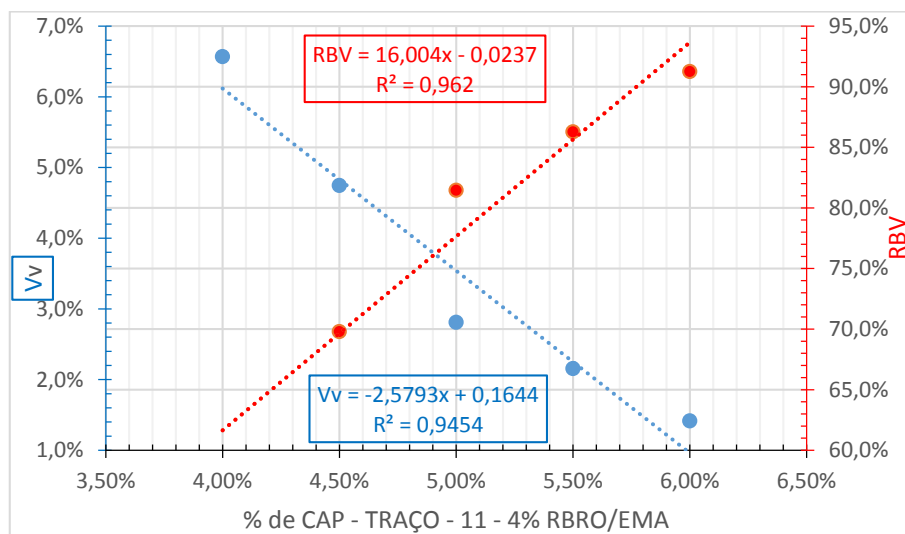


Tabela 4-24 : Parâmetros volumétricos da dosagem da mistura com 4% de RBRO/EMA.

| Teor de CAP (%) | DMT | Gmb | Vv (%) | VCB (%) | VAM (%) | RBV (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|---------|---------|---------|
| 4,00% | 2,614 | 2,442 | 6,6% | 9,6% | 16,2% | 59,5% |
| 4,50% | 2,592 | 2,469 | 4,7% | 11,0% | 15,7% | 69,8% |
| 5,00% | 2,571 | 2,499 | 2,8% | 12,3% | 15,1% | 81,4% |
| 5,50% | 2,551 | 2,496 | 2,2% | 13,6% | 15,7% | 86,3% |
| 6,00% | 2,530 | 2,495 | 1,4% | 14,8% | 16,2% | 91,3% |

Figura 4-23 : Teor de ligante versus Vv e RBV para a mistura com 4% de RBRO/EMA.

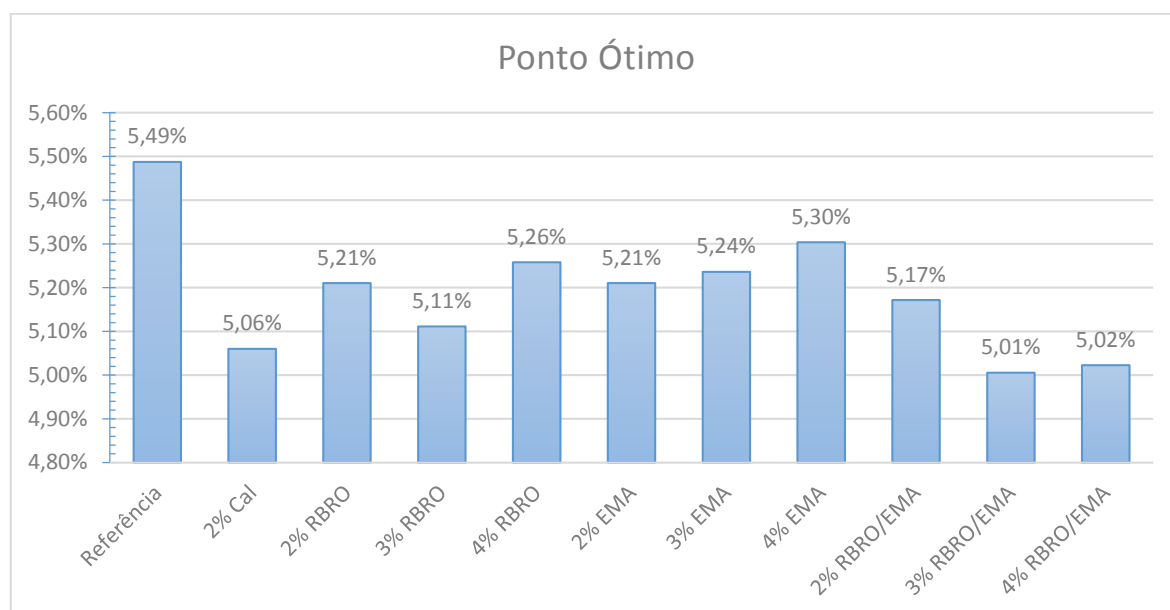


A Tabela 4.25 mostra-se a síntese dos resultados obtidos para as onze misturas onde estão listados os percentuais de CAP para 3% e 5% de Volume de Vazios e 75% e 82% de RBV e o ponto de Teor Ótimo para as misturas.

Tabela 4-25 : Teor de ligante de projeto.

| Mistura | % de CAP | | | | Teor Ótimo |
|-------------|----------|-------|-------|-------|------------|
| | Vv | | RBV | | |
| | 3% | 5% | 75% | 82% | |
| Referência | 5,76% | 4,92% | 5,24% | 5,74% | 5,49% |
| 2% Cal | 5,25% | 4,47% | 4,87% | 5,31% | 5,06% |
| 2% RBRO | 5,42% | 4,60% | 5,00% | 5,46% | 5,21% |
| 3% RBRO | 5,33% | 4,44% | 4,89% | 5,39% | 5,11% |
| 4% RBRO | 5,38% | 4,39% | 4,89% | 5,44% | 5,26% |
| 2% EMA | 5,41% | 4,66% | 5,01% | 5,44% | 5,21% |
| 3% EMA | 5,45% | 4,68% | 5,02% | 5,47% | 5,24% |
| 4% EMA | 5,51% | 4,80% | 5,09% | 5,52% | 5,30% |
| 2% RBRO/EMA | 5,38% | 4,59% | 4,97% | 5,42% | 5,17% |
| 3% RBRO/EMA | 5,20% | 4,36% | 4,81% | 5,27% | 5,01% |
| 4% RBRO/EMA | 5,21% | 4,44% | 4,83% | 5,27% | 5,02% |

Figura 4-24 : Teores Ótimos de ligante de projeto para as misturas estudadas.



De acordo com os valores mostrados na Tabela 4.25 e Figura 4.24, verifica-se uma redução dos valores do teor ótimo (TO) das misturas utilizando resíduo e cal em relação ao da mistura de referência. Verifica-se que uma quantidade adequada de fíler na mistura contribui para o preenchimento dos vazios da estrutura dos agregados que são ocupados somente pelo ligante. Essa de redução TO também foi comprovada na pesquisa realizada por Cavalcante & Soares (2001), em que foi avaliado o efeito da adição de seis tipos de fíleres em CA (areia de campo, pó de pedra, cimento Portland, pó calcário, carbonato de magnésio e cal hidratada), e o TO também diminuiu com o aumento do teor de fíler em todas as misturas. Se levarmos em consideração que o CAP é o componente de preço mais significativo nas misturas asfálticas, essa redução tem importante reflexo do ponto de vista do custo financeiro na produção da misturas asfálticas e o incremento de fíler, além de melhorar a qualidade da mistura, diminui o seu custo de produção.

4.5 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.5.1 Estabilidade e Fluência do Ensaio *Marshall*

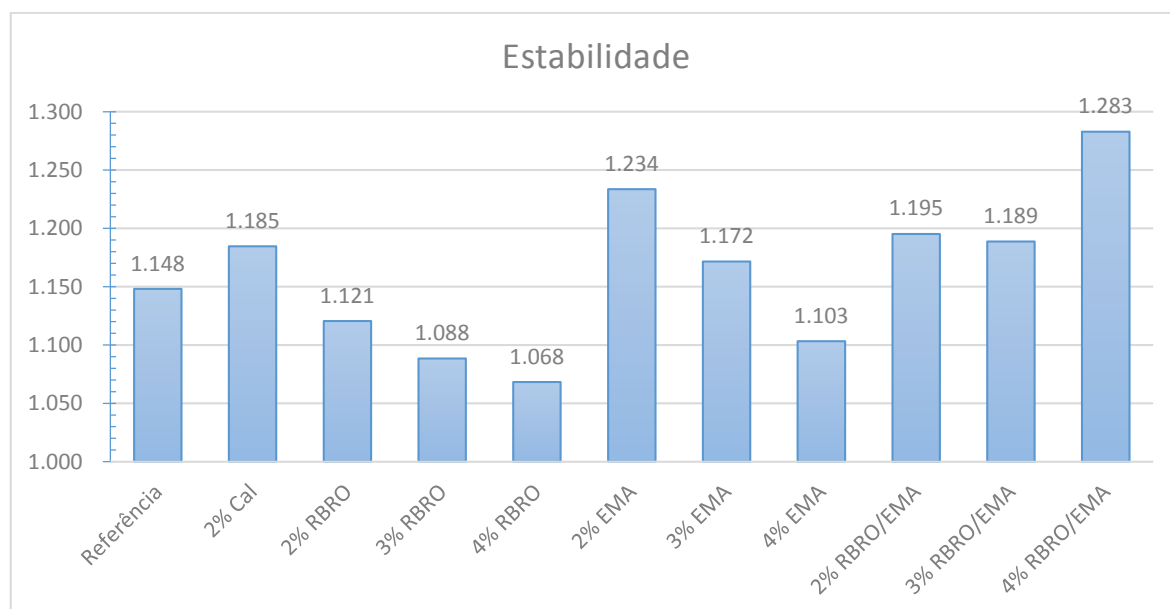
A execução do ensaio *Marshall* com adição de fíleres às misturas utilizando-se o teor ótimo de betume obtido serviu para a confirmação dos parâmetros volumétricos e obtenção da Estabilidade e Fluência, para atendimento dos requisitos técnicos para concretos asfálticos de acordo com a Especificação de Serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a). As Tabela 4.26 e 4.27 e as Figuras 4.25 e 4.26, apresentam estes resultados.

Tabela 4-26 : Estabilidade das Misturas no Ponto Ótimo.

| Mistura | Corpo de Prova | | | Média (kgf) | Desv. Pad. (kgf) | Coef.Var. (%) |
|--------------------|----------------|-------|-------|----------------|---------------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Referência | 1.162 | 1.134 | 1.148 | 1.148 | 13,88 | 1,21% |
| 2% Cal | 1.186 | 1.183 | 1.185 | 1.185 | 1,18 | 0,10% |
| 2% RBRO | 1.178 | 1.103 | 1.081 | 1.121 | 51,14 | 4,56% |
| 3% RBRO | 1.061 | 1.061 | 1.143 | 1.088 | 47,64 | 4,38% |
| 4% RBRO | 1.061 | 1.056 | 1.088 | 1.068 | 17,71 | 1,66% |
| 2% EMA | 1.322 | 1.266 | 1.112 | 1.234 | 108,71 | 8,81% |
| 3% EMA | 1.189 | 1.206 | 1.119 | 1.172 | 46,01 | 3,93% |
| 4% EMA | 1.098 | 1.147 | 1.065 | 1.103 | 41,01 | 3,72% |
| 2% RBRO/EMA | 1.217 | 1.175 | 1.193 | 1.195 | 21,07 | 1,76% |
| 3% RBRO/EMA | 1.215 | 1.187 | 1.165 | 1.189 | 25,27 | 2,13% |
| 4% RBRO/EMA | 1.284 | 1.259 | 1.305 | 1.283 | 22,95 | 1,79% |

Tabela 4-27 : Fluência das Misturas no Ponto Ótimo.

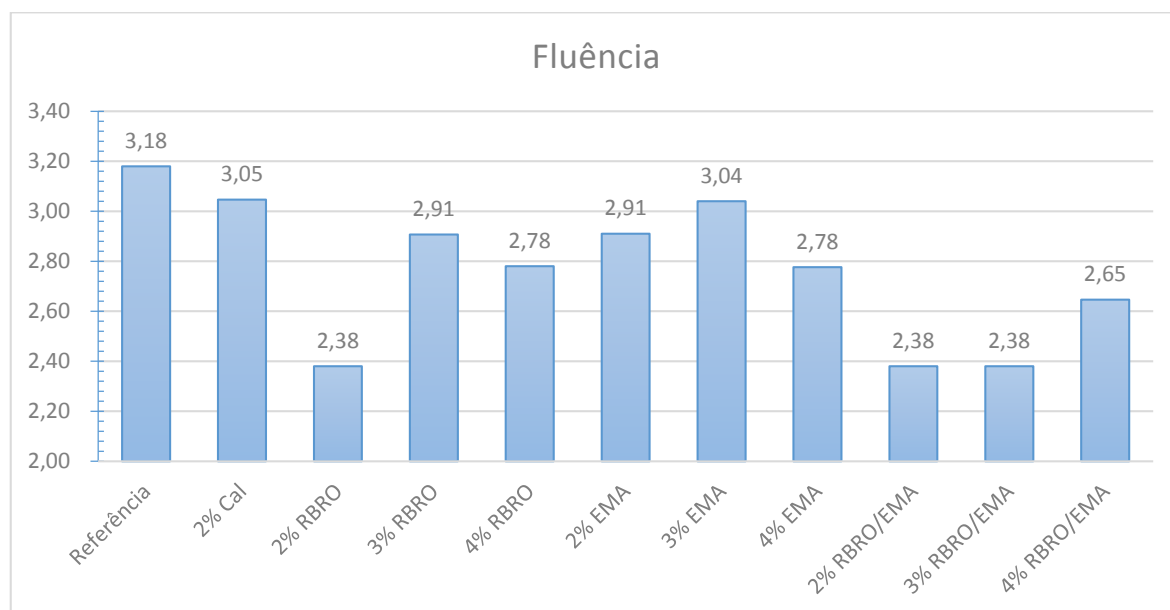
| Mistura | Corpo de Prova | | | Média (mm) | Desv. Pad. (mm) | Coef.Var. (%) |
|--------------------|----------------|------|------|---------------|--------------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Referência | 3,18 | 3,18 | 3,18 | 3,18 | 0,00 | 0,00% |
| 2% Cal | 2,78 | 3,18 | 3,18 | 3,05 | 0,23 | 7,58% |
| 2% RBRO | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 0,00 | 0,00% |
| 3% RBRO | 2,38 | 3,17 | 3,17 | 2,91 | 0,46 | 15,69% |
| 4% RBRO | 2,78 | 2,78 | 2,78 | 2,78 | 0,00 | 0,00% |
| 2% EMA | 2,78 | 2,78 | 3,17 | 2,91 | 0,23 | 7,74% |
| 3% EMA | 3,17 | 3,17 | 2,78 | 3,04 | 0,23 | 7,41% |
| 4% EMA | 2,78 | 2,38 | 3,17 | 2,78 | 0,40 | 14,23% |
| 2% RBRO/EMA | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 0,00 | 0,00% |
| 3% RBRO/EMA | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 0,00 | 0,00% |
| 4% RBRO/EMA | 2,78 | 2,38 | 2,78 | 2,65 | 0,23 | 8,73% |

Figura 4-25 : Variação da estabilidade *Marshall* em função do percentual de resíduo na mistura.

Consideradas as variações dos resultados individuais dos CPs em cada mistura, verifica-se que as misturas com adição de RBRO somente apresentaram valores de estabilidade inferiores que àqueles obtidos para as misturas de referência. O mesmo

ocorreu com a mistura utilizando 4% de EMA. Entretanto, todas as misturas satisfizeram aos requisitos da especificação que é de 500 kgf. Além disso, a mistura que apresentou maior redução de estabilidade em relação a mistura de referência foi a 4% RBRO porém esta redução foi de apenas 6,9%.

Figura 4-26 : Variação da Fluência em função do percentual de resíduo na mistura.



A mistura de referência apresentou maior fluência que as misturas com resíduos. A redução da fluência nas misturas com adição de resíduos tem relação com a redução do teor de ligante, que tornou as misturas mais rígidas e está relacionada a mudança de comportamento do mastique em função dos resíduos presentes na mistura.

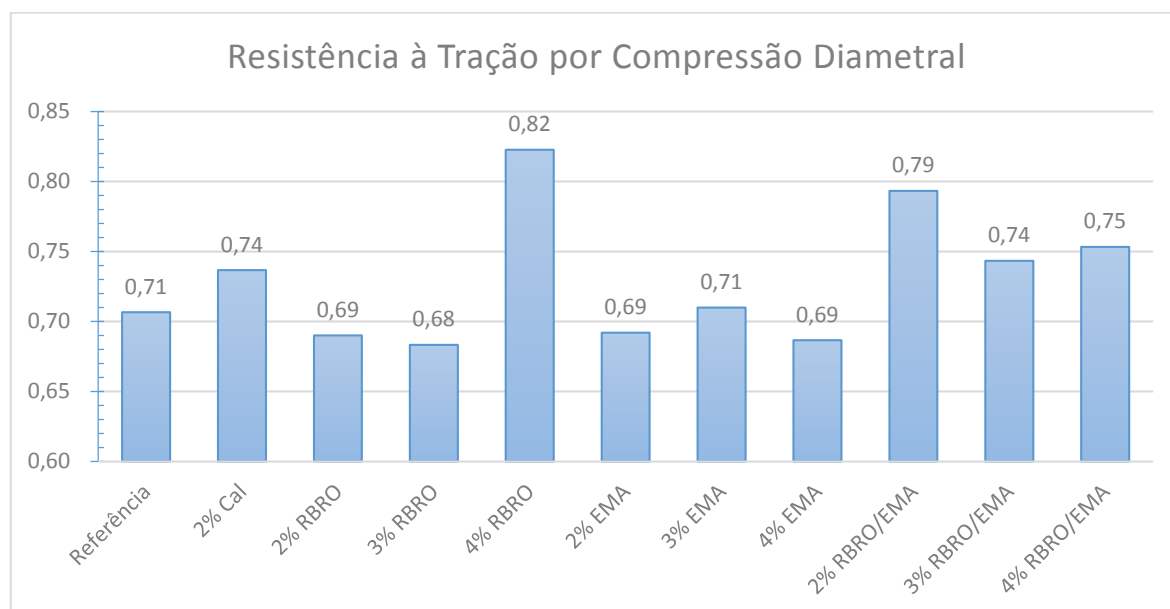
4.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os CPs ensaiados foram moldados em laboratório e submetidos a um condicionamento prévio mínimo de 4 horas à temperatura de 25 °C. Foram três (3) CPs para a determinação da RT, para cada uma das misturas 11 misturas 0%, 2%, 3% e 4% com a compactação *Marshall*, com os TP encontrados segundo os procedimentos de dosagem do método *Marshall*. Os resultados de cada um desses ensaios, a média aritmética e o desvio padrão estão mostrados na Tabela 4.28. Os valores de RT média de cada mistura podem ser visualizados graficamente na Figura 4.27.

Tabela 4-28 : Resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral.

| Mistura | Corpo de Prova | | | Média (MPa) | Desv. Pad. (MPa) | Coef.Var. (%) |
|--------------------|----------------|------|------|----------------|---------------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Referência | 0,66 | 0,69 | 0,77 | 0,71 | 0,06 | 8,05% |
| 2% Cal | 0,74 | 0,76 | 0,71 | 0,74 | 0,03 | 3,42% |
| 2% RBRO | 0,68 | 0,70 | 0,69 | 0,69 | 0,01 | 1,45% |
| 3% RBRO | 0,71 | 0,67 | 0,67 | 0,68 | 0,02 | 3,38% |
| 4% RBRO | 0,90 | 0,80 | 0,77 | 0,82 | 0,07 | 8,14% |
| 2% EMA | 0,66 | 0,71 | 0,70 | 0,69 | 0,03 | 3,80% |
| 3% EMA | 0,72 | 0,72 | 0,69 | 0,71 | 0,02 | 2,44% |
| 4% EMA | 0,72 | 0,66 | 0,68 | 0,69 | 0,03 | 4,45% |
| 2% RBRO/EMA | 0,75 | 0,83 | 0,80 | 0,79 | 0,04 | 5,09% |
| 3% RBRO/EMA | 0,77 | 0,74 | 0,72 | 0,74 | 0,03 | 3,39% |
| 4% RBRO/EMA | 0,77 | 0,78 | 0,71 | 0,75 | 0,04 | 5,03% |

Figura 4-27 : Valores de RT em função do percentual de resíduos na mistura.



Considerando os resultados apresentados na Tabela 4-28 e Figura 4-27, é possível observar que todas as misturas apresentaram valores de resistência à tração por compressão diametral estática superiores ao mínimo exigido pela Especificação de Serviço de concreto asfáltico para pavimentos flexíveis do DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a), que é de 0,65 MPa para misturas na faixa “C”, às quais são aplicadas em camada de rolamento ou de ligação (binder). Os valores encontrados estão no intervalo de 0,68 a 0,82 MPa e estão compatíveis com valores típicos de misturas asfálticas a quente recém moldadas, que são da ordem de 0,5 a 2,0 MPa (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Como pode-se observar o valor da RT na mistura de referência superou a RT nas misturas 2% e 3% de RBRO e 2% e 4% de EMA, entretanto, os valores não estão muito discrepantes dos de referência, com uma redução máxima encontrada de 4,2%. As demais misturas apresentaram valores igual ou maiores que a mistura de referência. Apesar disto, observa-se que, isolando-se as quatro misturas que ficaram abaixo da mistura de referência e a que teve o mesmo valor, ocorreu um aumento na RT, da ordem de 5%, para as misturas com 2% de Cal e 3% e 4% de RBRO/EMA, e em torno de 10% para as misturas de 4% de RBRO e 2% de RBRO/EMA, ou seja com o aumento do teor de resíduos, houve um aumento da RT, devendo-se este acréscimo à ação dos resíduos como um fíler ativo, pois o acréscimo de fíler alterou a consistência do ligante no mastique e sua interação com agregado. Cavalcante e Soares (2001) haviam concluído que ao aumentar o teor de fíler nas misturas asfálticas, os valores da resistência à tração também aumenta até um limite, quando começa a haver separação das partículas de maiores diâmetros, prejudicando a compactação da mistura e comprometendo a RT.

4.5.3 Desgaste de misturas betuminosas por abrasão – ensaio Cântabro

O valor do desgaste de cada amostra é obtido a partir da relação entre a diferença de massa do CP, no início e no final do ensaio, e a massa inicial da amostra. A temperatura durante o ensaio também foi controlada no ambiente do laboratório ($25 \pm 1^\circ \text{C}$).

O valor do desgaste por abrasão de cada tipo de mistura foi dado pela média aritmética de três amostras que diferiram no máximo em torno de pouco mais de 25% do valor médio das amostras.

Para misturas de pré-misturado a quente (PMQ), com asfalto polímero, para utilização como camada porosa de atrito, o limite do desgaste aceitável é de 25%, conforme a norma DNER – ES 386/99 (DNER, 1999a). Com a utilização desse ensaio na pesquisa, buscou-se verificar de que forma a adição de resíduo altera de o comportamento da mistura quanto à desagregação.

Os valores da Média, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do peso dos corpos de prova antes da realização do ensaio de desgaste são apresentados na Tabela 4.29. Os valores da Média, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação do peso dos corpos de prova após a realização do ensaio de desgaste são apresentados na Tabela 4.30.

Tabela 4-29 : Desgaste Cântabro Antes do Ensaio.

| Mistura | Corpo de Prova | | | Média (g) | Desv. Pad. (g) | Coef.Var. (%) |
|--------------------|----------------|----------|----------|------------------|-------------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Referência | 1.235,20 | 1.258,80 | 1.233,10 | 1.242,367 | 14,270 | 1,15% |
| 2% Cal | 1.255,30 | 1.270,80 | 1.256,00 | 1.260,700 | 8,754 | 0,69% |
| 2% RBRO | 1.253,69 | 1.234,08 | 1.225,30 | 1.237,690 | 14,535 | 1,17% |
| 3% RBRO | 1.257,71 | 1.235,45 | 1.269,40 | 1.254,187 | 17,247 | 1,38% |
| 4% RBRO | 1.237,52 | 1.248,30 | 1.261,74 | 1.249,187 | 12,134 | 0,97% |
| 2% EMA | 1.256,07 | 1.236,18 | 1.249,09 | 1.247,113 | 10,091 | 0,81% |
| 3% EMA | 1.257,82 | 1.250,47 | 1.248,90 | 1.252,397 | 4,762 | 0,38% |
| 4% EMA | 1.247,88 | 1.229,50 | 1.260,20 | 1.245,860 | 15,449 | 1,24% |
| 2% RBRO/EMA | 1.257,25 | 1.264,62 | 1.248,49 | 1.256,787 | 8,075 | 0,64% |
| 3% RBRO/EMA | 1.269,61 | 1.241,38 | 1.256,44 | 1.255,810 | 14,126 | 1,12% |
| 4% RBRO/EMA | 1.222,29 | 1.253,31 | 1.266,21 | 1.247,270 | 22,574 | 1,81% |

Tabela 4-30 : Desgaste Cântabro Após o Ensaio.

| Mistura | Corpo de Prova | | | Média (g) | Desv. Pad. (g) | Coef.Var. (%) |
|--------------------|----------------|----------|----------|------------------|-------------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Referência | 1.176,00 | 1.220,10 | 1.194,20 | 1.196,767 | 22,162 | 1,85% |
| 2% Cal | 1.185,60 | 1.225,80 | 1.184,80 | 1.198,733 | 23,444 | 1,96% |
| 2% RBRO | 1.198,14 | 1.188,73 | 1.188,23 | 1.191,700 | 5,583 | 0,47% |
| 3% RBRO | 1.216,81 | 1.179,06 | 1.208,25 | 1.201,373 | 19,792 | 1,65% |
| 4% RBRO | 1.170,28 | 1.190,06 | 1.217,42 | 1.192,587 | 23,671 | 1,98% |
| 2% EMA | 1.222,23 | 1.209,00 | 1.208,25 | 1.213,160 | 7,864 | 0,65% |
| 3% EMA | 1.216,10 | 1.207,95 | 1.214,57 | 1.212,873 | 4,332 | 0,36% |
| 4% EMA | 1.213,12 | 1.197,50 | 1.226,79 | 1.212,470 | 14,656 | 1,21% |
| 2% RBRO/EMA | 1.209,96 | 1.223,62 | 1.191,64 | 1.208,407 | 16,046 | 1,33% |
| 3% RBRO/EMA | 1.243,50 | 1.197,51 | 1.204,52 | 1.215,177 | 24,778 | 2,04% |
| 4% RBRO/EMA | 1.175,74 | 1.212,04 | 1.230,78 | 1.206,187 | 27,983 | 2,32% |

Na Tabela 4.31 e na Figura 4.28 apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de perda de massa por desgaste Cântabro.

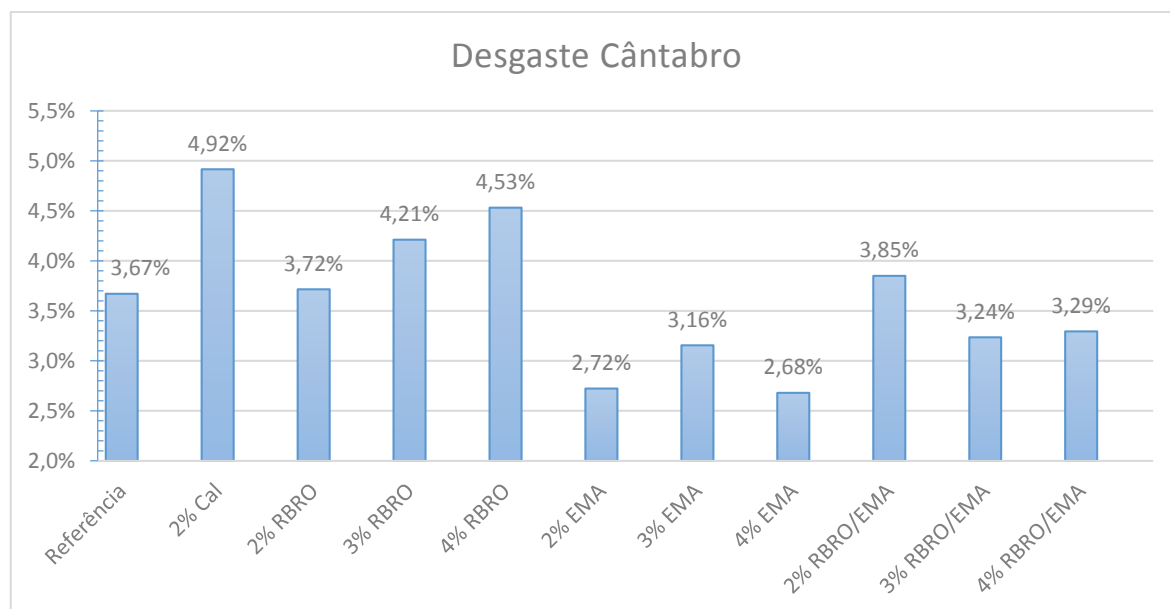
Tabela 4-31 : Resultados dos ensaios de desgaste Cântabro.

| Mistura | Situação | Corpo de Prova | | | Média (g) | Desgaste (%) |
|-------------|----------|----------------|----------|----------|-----------------|-----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| Referência | Antes | 1.235,20 | 1.258,80 | 1.233,10 | 1.242,37 | 3,67% |
| | Depois | 1.176,00 | 1.220,10 | 1.194,20 | 1.196,77 | |
| 2% Cal | Antes | 1.255,30 | 1.270,80 | 1.256,00 | 1.260,70 | 4,92% |
| | Depois | 1.185,60 | 1.225,80 | 1.184,80 | 1.198,73 | |
| 2% RBRO | Antes | 1.253,69 | 1.234,08 | 1.225,30 | 1.237,69 | 3,72% |
| | Depois | 1.198,14 | 1.188,73 | 1.188,23 | 1.191,70 | |
| 3% RBRO | Antes | 1.257,71 | 1.235,45 | 1.269,40 | 1.254,19 | 4,21% |
| | Depois | 1.216,81 | 1.179,06 | 1.208,25 | 1.201,37 | |
| 4% RBRO | Antes | 1.237,52 | 1.248,30 | 1.261,74 | 1.249,19 | 4,53% |
| | Depois | 1.170,28 | 1.190,06 | 1.217,42 | 1.192,59 | |
| 2% EMA | Antes | 1.256,07 | 1.236,18 | 1.249,09 | 1.247,11 | 2,72% |
| | Depois | 1.222,23 | 1.209,00 | 1.208,25 | 1.213,16 | |
| 3% EMA | Antes | 1.257,82 | 1.250,47 | 1.248,90 | 1.252,40 | 3,16% |
| | Depois | 1.216,10 | 1.207,95 | 1.214,57 | 1.212,87 | |
| 4% EMA | Antes | 1.247,88 | 1.229,50 | 1.260,20 | 1.245,86 | 2,68% |
| | Depois | 1.213,12 | 1.197,50 | 1.226,79 | 1.212,47 | |
| 2% RBRO/EMA | Antes | 1.257,25 | 1.264,62 | 1.248,49 | 1.256,79 | 3,85% |
| | Depois | 1.209,96 | 1.223,62 | 1.191,64 | 1.208,41 | |
| 3% RBRO/EMA | Antes | 1.269,61 | 1.241,38 | 1.256,44 | 1.255,81 | 3,24% |
| | Depois | 1.243,50 | 1.197,51 | 1.204,52 | 1.215,18 | |
| 4% RBRO/EMA | Antes | 1.222,29 | 1.253,31 | 1.266,21 | 1.247,27 | 3,29% |
| | Depois | 1.175,74 | 1.212,04 | 1.230,78 | 1.206,19 | |

A determinação de resistência à desagregação dos CP's avaliada pelo desgaste Cântabro demonstrou que a diminuição do teor de ligante para a mistura com a presença de 2% de Cal, foi o fator determinante para a perda de material, uma vez

que o mesmo atua como o elo de ligação dos agregados das misturas e sua diminuição aumentou a exposição dos agregados ao desgaste provocado pelo ensaio.

Figura 4-28 : Valores do Desgaste em função do percentual de resíduos na mistura.



Apesar da diminuição discreta do teor de CAP nas misturas com 2%, 3% e 4% de RBRO, EMA e da mistura de RBRO+EMA, não houve um desgaste tão significativo em relação à mistura de referência, que apresenta um teor de CAP maior do que as misturas com resíduo. Ressalta-se que os melhores resultados foram apresentados pela mistura com 2%, 3% e 4% de EMA e 3% e 4% de RBRO/EMA e provavelmente estão ligados à sua atuação como fíler ativo, ou seja, capaz de produzir reações físico-químicas benéficas à mistura asfáltica.

4.5.4 Efeito deletério da água

A relação entre a RT de CPs submetidos ao condicionamento e a RT de CPs não condicionados é chamada de Razão de Resistência à Tração (RRT). O critério de aceitação das misturas é de $RRT \geq 70\%$. Os resultados dos ensaios que apresentam uma RRT maior ou igual a 80% não são consideradas susceptíveis ao dano por umidade (FURLAN, 2006).

Os valores da Média, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação da Resistência a Tração por compressão diametral para os corpos de prova condicionados são apresentados na Tabela 4.30. Os valores da Média, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação da Resistência a Tração diametral para os corpos de prova não condicionados são apresentados na Tabela 4.31.

Tabela 4-32 : Resistência à Tração por Compressão Diametral Condicionado.

| Mistura | Corpo de Prova | | | Média (MPa) | Desv. Pad. (MPa) | Coef.Var. (%) |
|--------------------|----------------|-------|-------|----------------|---------------------|------------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Referência | 0,150 | 0,150 | 0,151 | 0,150 | 0,001 | 0,35% |
| 2% Cal | 0,199 | 0,206 | 0,214 | 0,207 | 0,007 | 3,47% |
| 2% RBRO | 0,229 | 0,179 | 0,235 | 0,214 | 0,031 | 14,23% |
| 3% RBRO | 0,149 | 0,148 | 0,163 | 0,153 | 0,008 | 5,36% |
| 4% RBRO | 0,143 | 0,149 | 0,189 | 0,160 | 0,025 | 15,72% |
| 2% EMA | 0,198 | 0,188 | 0,183 | 0,190 | 0,008 | 4,11% |
| 3% EMA | 0,235 | 0,209 | 0,212 | 0,219 | 0,014 | 6,37% |
| 4% EMA | 0,217 | 0,196 | 0,214 | 0,209 | 0,012 | 5,53% |
| 2% RBRO/EMA | 0,215 | 0,214 | 0,215 | 0,215 | 0,001 | 0,25% |
| 3% RBRO/EMA | 0,223 | 0,223 | 0,217 | 0,221 | 0,003 | 1,41% |
| 4% RBRO/EMA | 0,219 | 0,241 | 0,242 | 0,234 | 0,013 | 5,67% |

Tabela 4-33 : Resistência à Tração Compressão Diametral Não Condicionado.

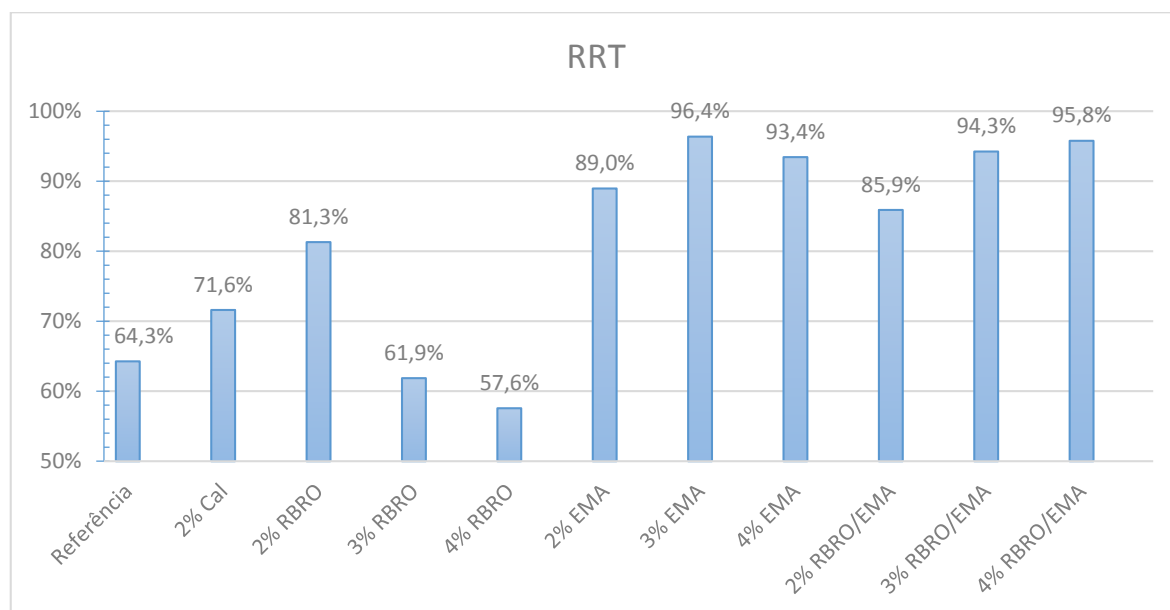
| Mistura | Corpo de Prova | | | Média (MPa) | Desv. Pad. (MPa) | Coef.Var. (%) |
|--------------------|----------------|-------|-------|----------------|---------------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Referência | 0,236 | 0,232 | 0,234 | 0,234 | 0,002 | 0,81% |
| 2% Cal | 0,317 | 0,285 | 0,264 | 0,288 | 0,027 | 9,28% |
| 2% RBRO | 0,263 | 0,239 | 0,290 | 0,264 | 0,026 | 9,83% |
| 3% RBRO | 0,282 | 0,245 | 0,217 | 0,248 | 0,033 | 13,23% |
| 4% RBRO | 0,284 | 0,300 | 0,250 | 0,278 | 0,026 | 9,21% |
| 2% EMA | 0,204 | 0,211 | 0,225 | 0,213 | 0,011 | 5,13% |
| 3% EMA | 0,233 | 0,227 | 0,221 | 0,227 | 0,006 | 2,62% |
| 4% EMA | 0,226 | 0,223 | 0,222 | 0,224 | 0,002 | 0,90% |
| 2% RBRO/EMA | 0,254 | 0,245 | 0,252 | 0,250 | 0,005 | 2,00% |
| 3% RBRO/EMA | 0,231 | 0,237 | 0,235 | 0,234 | 0,003 | 1,15% |
| 4% RBRO/EMA | 0,241 | 0,255 | 0,236 | 0,244 | 0,010 | 4,07% |

Os valores médios de RT dos CPs condicionados e não condicionados e os valores da RRT estão mostrados na Tabela 4.32. Na Figura 4.29 apresenta-se, gráficos com os valores da RRT.

Tabela 4-34 : Resultados da relação de resistência a tração (RRT).

| Mistura | RT | Corpo de Prova | | | Média (MPa) | RRT (%) |
|-------------|--------|----------------|-------|-------|----------------|--------------|
| | | 1 | 2 | 3 | | |
| Referência | cond | 0,150 | 0,150 | 0,151 | 0,150 | 64,3% |
| | ñ cond | 0,236 | 0,232 | 0,234 | 0,234 | |
| 2% Cal | cond | 0,199 | 0,206 | 0,214 | 0,207 | 71,6% |
| | ñ cond | 0,317 | 0,285 | 0,264 | 0,288 | |
| 2% RBRO | cond | 0,229 | 0,179 | 0,235 | 0,214 | 81,3% |
| | ñ cond | 0,263 | 0,239 | 0,290 | 0,264 | |
| 3% RBRO | cond | 0,149 | 0,148 | 0,163 | 0,153 | 61,9% |
| | ñ cond | 0,282 | 0,245 | 0,217 | 0,248 | |
| 4% RBRO | cond | 0,143 | 0,149 | 0,189 | 0,160 | 57,6% |
| | ñ cond | 0,284 | 0,300 | 0,250 | 0,278 | |
| 2% EMA | cond | 0,198 | 0,188 | 0,183 | 0,190 | 89,0% |
| | ñ cond | 0,204 | 0,211 | 0,225 | 0,213 | |
| 3% EMA | cond | 0,235 | 0,209 | 0,212 | 0,219 | 96,4% |
| | ñ cond | 0,233 | 0,227 | 0,221 | 0,227 | |
| 4% EMA | cond | 0,217 | 0,196 | 0,214 | 0,209 | 93,4% |
| | ñ cond | 0,226 | 0,223 | 0,222 | 0,224 | |
| 2% RBRO/EMA | cond | 0,215 | 0,214 | 0,215 | 0,215 | 85,9% |
| | ñ cond | 0,254 | 0,245 | 0,252 | 0,250 | |
| 3% RBRO/EMA | cond | 0,223 | 0,223 | 0,217 | 0,221 | 94,3% |
| | ñ cond | 0,231 | 0,237 | 0,235 | 0,234 | |
| 4% RBRO/EMA | cond | 0,219 | 0,241 | 0,242 | 0,234 | 95,8% |
| | ñ cond | 0,241 | 0,255 | 0,236 | 0,244 | |

Figura 4-29 : Valores de RRT em função do percentual de resíduos na mistura.



As misturas de referência, 3% e 4% de RBRO tiveram suas RRT menores que 70%, o que indica que essas misturas são consideradas susceptíveis ao dano por umidade, ou seja, são afetadas pela presença de água. A mistura com 2% de Cal, apresenta boa tolerância a ação da água. Já as misturas com 2% de RBRO e as de 2%, 3% e 4% de EMA e RBRO/EMA, mostram-se não susceptíveis ao dano por umidade, pois valores de RRT que estão acima de 80%, indicam que as misturas não são susceptíveis ao dano causado pela água.

Por meio da análise mineralógica pelo ensaio de Difração de Raio X, observou-se a presença de cálcio nas composições dos resíduos em estudo. Este fato pode ter contribuído para o aumento na resistência ao efeito deletério da água (exceto para 3% e 4% de RBRO) uma vez que é comprovado pela comunidade técnica e científica que este componente, até certa medida, reduz o dano devido a umidade entre outros benefícios como redução da oxidação das misturas asfálticas o que reduz o envelhecimento e a deterioração das mesmas.

Capítulo 5

Um homem que não se alimenta de seus sonhos, envelhece cedo.

William Shakespeare

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

No capítulo anterior foram apresentados os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Foram apresentados os resultados da caracterização física e mineralógica dos materiais que compõem as misturas asfálticas de referência e as com a adição dos fíleres da Cal e dos resíduos de RBRO, EMA e da mistura de RBRO/EMA. Também foram apresentados os resultados da caracterização mecânica das misturas asfálticas.

Neste capítulo são apresentados as principais conclusões obtidas nesta pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras correlatos aos aqui apresentados.

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Quanto à caracterização dos resíduos

Os resíduos de RBRO, EMA e da mistura de RBRO+EMA, apresentaram uma distribuição do tamanho das partículas característica de fíler ativo. Todas foram passadas na peneira de malha quadrada nº 200. Não apresentaram solubilidade quando imersos em querosene, o que sugere que os resíduos permanecem inertes quando envolvidos pelo CAP da mistura asfáltica.

A adição do resíduo de 2%, 3% e 4% de RBRO, EMA e da mistura de RBRO+EMA, permitiram uma redução de consumo de CAP quando comparados com a mistura de referência (sem resíduo), devido provavelmente ao aumento do teor de finos das misturas. Quando comparados à mistura com 2% de Cal, apresentaram um pequeno aumento no consumo de CAP.

5.1.2 Quanto à dosagem *Marshall* das misturas asfálticas

A adição do resíduo de RBRO e EMA, permitiram uma redução de consumo de CAP de aproximadamente de 8,0% nas misturas com 2% de Cal, 3% e 4% de RBRO/EMA, 7% nas misturas de 3% de RBRO e em torno de 8% nas demais misturas, em

comparação com a mistura sem resíduo, verificando-se a diminuição do teor de ligante de projeto.

Todas as misturas atenderam aos requisitos da norma de concreto asfáltico do DNIT, quanto ao valor de estabilidade mínima. As misturas com adição de EMA apresentaram uma tendência de um maior valor de estabilidade, mas em quase todas as misturas, à medida que se acrescentavam os resíduos os valores de estabilidade diminuía, a exceção dos valores com adição de 4% de RBRO/EMA.

A mistura de referência apresentou o maior valor de fluência, enquanto que o menor valor foram das misturas com 2% de RBRO e 2% e 3% de RBRO/EMA.

5.1.3 Quanto à caracterização mecânica e a adesividade das misturas

Além da influência dos resíduos de RBRO e EMA como material de enchimento, que por si só aumentou a rigidez das misturas, os resultados estão vinculados à diferença do teor de ligante, que na mistura de referência foi maior do que nas misturas que receberam adição de resíduos.

As misturas de referência e as com a adição de resíduos de 2%, 3% e 4% de RBRO, EMA e da mistura de RBRO+EMA, atenderam aos requisitos da norma de concreto asfáltico do DNIT, quanto ao valor de estabilidade e resistência à tração mínima.

As misturas de referência e as com a adição de resíduos de 2%, 3% e 4% de EMA e da mistura de RBRO+EMA, apresentaram valores de RRT acima das misturas de referência e Cal 2%, verificado pelo Ensaio de *Lottman* Modificado.

Os resíduos de RBRO, EMA e da mistura de RBRO+EMA mantiveram e em alguns pontos melhoraram as propriedades mecânicas analisadas, o que torna viável tecnicamente a adição desse tipo de resíduo como material de enchimento em CA, além de promover uma destinação ambientalmente correta e aceitável dos rejeitos que são depositados a céu aberto nos pátios das mineradoras, além de se apresentar como mais uma alternativa para as siderúrgicas locais.

As misturas contendo RBRO com 3% e 4% de resíduos na mistura, mostraram maior sensibilidade à variação de temperatura imposta pelo ensaio de *Lottman* modificado, mostrando que a mistura contendo este material apresenta valores fora dos recomendados pela literatura.

Todas as misturas atenderam aos requisitos da norma de concreto asfáltico do DNIT quanto ao valor de resistência à tração mínima. Considerando a diferença no teor de ligante, a resistência à tração das misturas mantiveram-se as mesmas a exceção da mistura com 2% de Cal, 4% de RBRO, a maior delas e os três conjuntos das misturas com 2%, 3% e 4% de RBRO/EMA, onde houve um ganho em torno de 4% a 10% com o aumento da adição de resíduo.

5.1.4 Considerações finais

Os Resíduos de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (RBRO) e Escória Moída de Aciaria (EMA), agregaram às misturas asfálticas estudadas, alterações positivas nas propriedades mecânicas abordadas, indicando ser viável a adição dos resíduos como material de enchimento em misturas betuminosas do tipo CA.

Para avaliarmos uma escala de produção, consideraremos uma usina com capacidade produtiva de 60 t/hora, trabalhando 6 horas por dia, teríamos um total de 360 t de CA por jornada e considerando um consumo médio de 2% de fíler, teríamos o consumo de 7,2 toneladas de resíduo por dia. Se considerarmos uma pista com 7,5 m de largura e 5 cm de espessura, utilizaríamos aproximadamente 18 toneladas de resíduo de por quilômetro de CA aplicado.

Mais pesquisas são necessárias para reforçar as conclusões apresentadas neste trabalho, no entanto, de acordo com os resultados obtidos conclui-se que a utilização de RBRO, EMA e da mistura de RBRO/EMA como fíler em misturas asfálticas mostram-se como uma alternativa tecnicamente viável e real.

Capítulo 6

Não há nada bom nem mau a não ser estas duas coisas: a sabedoria que é um bem e a ignorância que é um mal.

Platão

6 BIBLIOGRAFIA

6.1 BIBLIOGRAFIA REFERENCIADA

ALDIGUERI, D. R.; PARENTE, E. B.; SOARES, J. B. Estudo da aplicabilidade de solo contaminado com petróleo como material para revestimento de vias de baixo volume de tráfego. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 18., 2004, Florianópolis. Anais...Florianópolis: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

AL-QUADI, I. L.; SAYED, T.; ALNUAIME, N. A.; MASAD, E. Efficient transportation and pavement systems: Characterization, mechanisms, simulation and modeling. London: Taylor & Francis Group, 2009.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS & ABEDA, 2006.

BRASIL. Lei n.12305, de 2 de agosto de 2010. Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, 3 ago. 2010. Seção 1, p.3-9.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002**. 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 25 mai. 2015.

CASTELO BRANCO, V. T. F. Caracterização de misturas asfálticas com uso de escória de aciaria como agregado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

CAVALCANTE, V. T. F.; SOARES, J. B. O efeito do tipo e do teor de fíler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. In: Reunião Anual de Pavimentação, 33., Florianópolis. Anais...Florianópolis: ABPv, 2001.

CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, Eleno de Paula; ARTUR, Antonio Carlos. Panorama técnico-econômico do setor de rochas ornamentais no Brasil. Geociências. UNESP, São Paulo, v. 23, n. 1/2, p. 5-20, 2004.

.

CHIODI FILHO, C.. Situação do setor de rochas ornamentais e de revestimento no Brasil – Mercados interno e externo. In: V SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2005, Recife/Pernambuco. Anais... Recife: PPGEMinas, SBG, CETEM, p. 325-347, 2005.

COSTA, C.; PINTO, S.; VENTORINI, L. A. Uso de rejeito industrial em misturas do tipo concreto asfáltico. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 9, p. 6-16, 2008.

CUNHA, M. B. Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

FERNANDES, MACEL WALLACE QUEIROZ. Utilização de resíduos sólidos no estudo da susceptibilidade do concreto asfáltico à presença d'água - Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro Tecnologia e Recursos Naturais, 2007.

FERNANDES, M. W. Q.; RODRIGUES, J. K. G.; LUCENA, L. C. F. L.; LUCENA, A. E. F. L. Utilização dos filleres do resíduo do caulim e do granito em misturas asfálticas. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 11, p. 43-50, 2008.

FRASCÁ, M. H. B. O.. Rocha como material de construção. In: ISAIA, Geraldo Cechella. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e princípios de ciência e engenharia de materiais. São Paulo: IBRACON, v1, p.437-480, 2007.

FROTA, C. A; MENTA, C. O.; NUNES, F. R. G. Utilização de entulho reciclado em misturas asfálticas para a região de Manaus-AM. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003. Aracaju. Anais...Aracaju: ABPv, 2003a.

FROTA, C. A; NUNES, F. R. G.; ALENCAR, C. L. S. Estudo da cal de carbureto como fíler em misturas asfálticas. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003, Aracaju. Anais... Aracaju: ABPv, 2003b.

FROTA, C. A; NUNES, F. R. G.; SILVA, C. L. Estudo da substituição de seixo por agregados sintéticos de argila calcinada em misturas asfálticas. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003, Aracaju. Anais... Aracaju: ABPv, 2003c.

FURLAN, A.P. *et al.*, Algumas Considerações Acerca de Ensaios para Avaliação do Dano por Umidade em Mistura Asfáltica Densa, in: 35ª Reunião Anual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 2004.

FURLAN, A. P. Considerações acerca da adesão e da susceptibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

GOTTARDI, E.V.; CALMON, J. L.; TEIXEIRA. J. E. S. L.. Aproveitamento do resíduo de beneficiamento de rochas ornamentais e de escória de aciaria como fíler em pavimentos de concreto asfáltico usinado a quente: Reunião de Pavimentação Urbana, 19., 2013. Cuiabá. Anais... Cuiabá: ABPv, 2013.

LUCENA, A. E. F. L. Utilização de cascalhos de perfuração oriundos das atividades de exploração de petróleo em revestimentos asfálticos de estradas. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2008.

LUCENA, L. C. F. L.; RODRIGUES, J. K. G.; MORAIS, C. R. S.; LUCENA, A. E. F. L.; LUCENA, L. F. L.; Utilização de resíduo vítreo como fíler em misturas asfálticas. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008, Recife. Anais... Recife: ABPv, 2008.

LUCENA, L. C. F. L. Verificação da influência do uso de resíduos industriais como fíler em misturas asfálticas sob efeito da presença d'água. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2009.

MACÊDO, R. M.; CAVALCANTE, F. P.; MACÊDO, J. A. G.; MOTTA, L. M. G.; COSTA, L. M. Aproveitamento de resíduos da construção e demolição para fins de pavimentação no estado da Paraíba. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008, Recife. Anais... Recife: ABPv, 2008.

MARQUES, G. L. O. Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

MENDONÇA, R. L.; RODRIGUES, G. L. C.; ALVES, J. N. Utilização de escória de aciaria como revestimento primário. In: Reunião Anual de Pavimentação, 39., 2008. Recife. Anais... Recife: ABPv, 2008.

MOIZINHO, J. C.; CARVALHO, J. C.; FARIAS, M. M. Agregado laterítico do estado de Roraima e seu uso em CBUQ. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., 2005. Curitiba. Anais... Curitiba: ABPv, 2005.

MOTTA, L. M. G.; FERNANDES, C. Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 12., 2003. Aracaju. Anais... Aracaju: ABPv, 2003.

MOTTA, L. M. G., LEITE, L. F. M. Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, 11., 2000, Gramado. Anais... Gramado, 1998. p. 1007-1017.

MUGAYAR, A. N.; BALBO, J. T.; SACHET, T.; PINTO, P. C.; ALBUQUERQUE, M. C. F. Avaliação do efeito da adição de borracha moída de pneus no concreto compactado

com rolo. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABPv, 2009.

NASCIMENTO, MARIA DAS VITÓRIAS DO. Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Recicladas / Maria das Vitórias do Nascimento. — Campina Grande, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

NÓBREGA, R. D.; MELO, R. A. Uso de agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa. In: Encontro Nacional Sobre Aproveitamento de Resíduos da Construção, Feira de Santana. Anais... Feira de Santana: ANTAC, 2009.

ONOFRE, F. C.; LOPES, M. M.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B. Aplicação de solos contaminados por petróleo em misturas asfálticas. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABPv, 2009.

PAIVA, O. A.; LIMA, S. P. B.; CAMPELO N. S.; CAMPOS, A. M. L. S.; SILVA, J.F.A.; TAVEIRA, A.F.S.; REBELO, E. P. Emprego de resíduo cerâmico do pólo oleiro de Iranduba/AM, em substituição ao filler de misturas asfálticas à quente – CBUQ. In: Reunião Anual de Pavimentação, 38., 2007, Manaus. Anais... Manaus: ABPv, 2007.

PATRIOTA, M. B. Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

PINHEIRO, J. H. M. Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos úmido e seco). Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

PINHEIRO, J. H. M.; SOARES, J. B.; LEITE, L. F. M. Caracterização de misturas asfálticas com borracha produzida pelos processos úmido e seco. 2008.

PINTO, S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

SACHET, T.; BALBO, J. T.; PINTO, P.; MUGAYAR, A. N.; C.; ALBUQUERQUE, M. C. F. Avaliação do efeito da adição de borracha moída de pneus no concreto compactado com rolo. In: Reunião de Pavimentação Urbana, 16., 2009, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABPv, 2009.

SANTANA, H. Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e Definições de Filler em Misturas Asfálticas. In: Reunião Anual de Pavimentação, 29., 1995. Anais... Cuiabá: ABPv, 1995, vol. 1; p. 574-604.

SARDOU FILHO, R.; MATOS, G. M. M.; MENDES, V. A.; IZA, E. R. H. F. Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo / CPRM, 2013.

SOARES, J. B.; FREITAS, F. A. C.; CASTELO BRANCO, J. V.; MOTTA, L. M. G. Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32., Brasília. Anais... Brasília, ABPv, 2000, v. I, p. 148-160.

SOARES, R. B. Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos Produzidos com a Incorporação de Resíduo do Beneficiamento de Rochas Ornamentais. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

SOUZA, J.N.; RODRIGUES, J.K.G.; NETO, P.N.S. Utilização do resíduo proveniente da serragem de rochas graníticas como material de enchimento em concretos asfálticos usinados a quente. Associação Técnico Científica Ernesto Luiz de Oliveira Júnior. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

SOUZA, J. B. Q. Comportamento de misturas asfálticas a quente com agregados provenientes de jazidas de seixo no estado do Pará. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2007.

SPECHT, L. P. Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; CERATTI, J. A. P. Análise reológica de ligantes modificados com borracha reciclada de pneus. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 7, p. 37-44, 2007a.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; BRITO L. A. T. Avaliação das propriedades plásticas de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneus por meio dos processos úmido e seco. Revista Pavimentação, Rio de Janeiro, n. 8, p. 34-43, 2007b.

SOARES, J. B.; FREITAS, F. A. C.; CASTELO BRANCO, J. V.; MOTTA, L. M. G. Método de Previsão do Teor Ótimo de Ligante em Misturas Asfálticas tipo CBUQ. In: Reunião Anual de Pavimentação, 32., Brasília. Anais... Brasília, ABPv, 2000, v. I, p. 148-160.

TAVARES, D. S.; ODA, S.; MOTTA, L. M. G.; Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em pavimentação asfáltica, 2011.

VALE, A. C. Estudo laboratorial da viabilidade do uso de fibras de coco em misturas asfálticas do tipo SMA. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

VALE, A. C.; SOARES, J. B.; CASAGRANDE, M. D. T. Misturas asfálticas do tipo SMA com fibra de coco. In: Reunião Anual de Pavimentação, 38., Manaus. Anais... Manaus: ABPv, 2007.

VASCONCELOS, K. L. Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias *Marshall* e *Superpave* com diferentes granulometrias. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

VASCONCELOS, K. L.; SOARES, J. B. Efeito da densidade máxima teórica e da densidade aparente do corpo-de-prova compactado na dosagem de misturas asfálticas. In: Reunião Anual de Pavimentação, 36., Curitiba. Anais... Curitiba: ABPv, 2005.

WESSELING, D. H. Estudo do comportamento mecânico de misturas em concreto asfáltico com incorporação de resíduos industriais. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

WESSELING, D. H.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial do comportamento de misturas em concreto asfáltico com diferentes tipos de fílers. In: Reunião Anual de Pavimentação, 34., Campinas. Anais... Campinas: ABPv, 2003.

6.2 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

CALMON, J. L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S.; DA SILVA, S. A. C.; MATTOS, F. V. Reciclagem do resíduo de corte de granito para a produção de argamassas. In: Encontro Nacional de Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1., 1997, Canela. Anais...Canela: ANTAC. 1997.

CALMON, J.L. Resíduos industriais e agrícolas. Capítulo 51. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Ed. G.C. Isaia. 2.ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 2v.

CALMON, J.L.; MORATTI, M., SOUZA, F.L.S.; CENCI, D.S. Concreto auto-adensável (CAA) utilizando resíduo de serragem de rochas ornamentais como fíler. Publicações IBRACON, 2005.

CALMON, J.L.; TRISTÃO, F. A.; LORDÊLLO, F. S. S. ; DA SILVA, S. A. C. ; MATTOS, F. V. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para a produção de tijolos de solo cimento. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Qualidade no processo construtivo, 7., 1998, Florianópolis. Anais...Santa Catarina: ANTAC. 1998.

CASAGRANDE, M. D. T. ; GINO OMAR CALDERÓN VIZCARRA ; LUCIANNA SZELIGA ; MOTTA, LAURA M. G. . Estudo do Comportamento de um Solo Estabilizado com Cinzas de Incineração de Resíduo Sólido Urbano para Aplicação em Camadas de Base de Pavimentos. Revista Pavimentação, 2012, Rio de Janeiro, Brasil.

HARRIS, B. M.; STUART, K. D. Analysis of mineral fillers and mastic used in stone matrix asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, Portland, Oregon, EUA, v. 64, p. 54-95, 1995.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

LOTTMAN, R. P. NCHRP Report 192: Predicting Moisture – Induced Damage to Asphaltic Concrete, Transportation Research Board, National Research Council, 24p. Washington, D. C., 1978.

LOUREIRO, T. G. Estudo da evolução do dano por fadiga em misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2003.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos pavimentos. 3. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2015.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. Pavimentação Rodoviária - Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro: Editora COPIARTE, 2002.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W.; Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NAPA Educational Foundation, Lanham, Maryland, 1996.

6.3 BIBLIOGRAFIA DE NORMAS E PROCEDIMENTOS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 12891: Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall. Rio de Janeiro, 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T-283: Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. Washington, USA, 1989.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 085/94: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER ME 086/94 – Agregado - Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 133/94 – Misturas betuminosas – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 269/94 – Projeto de restauração de pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 1994d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 138/94 - Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994e.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 043/95 - Misturas betuminosas a quente - ensaio *Marshall*. Rio de Janeiro, 1995a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 084/95 – Agregado miúdo – Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER PRO 199/96 – Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 054/97- Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 195/97 - Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER EM 367/97 - Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro, 1997c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 035/98 – Agregados – Determinação da abrasão a *Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE DEESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 081/98 – Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE DEESTRADAS DE RODAGEM DNER - ME 083/98 – Analise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM DNER ME 194/98 - Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998d.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT TER 005/2003 – Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos, Terminologia. Rio

de Janeiro, 2003a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT PRO 006/2003 – Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos, Procedimento. Rio de Janeiro, 2003b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT ES 033/2005: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente na usina – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2005a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT ES 034/2005: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico reciclado a quente no local – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2005b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT ES 031/2006 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. Manual de pavimentação. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2006b.